

**Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН**

УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

***Выпуск 76
Ноябрь 2018***

**СБОРНИК
ТРУДОВ**

ISSN 1819-2467

Регистрационный номер Эл. №ФС77-44158 от 09 марта 2011 г.

Москва – 2018

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова

**УПРАВЛЕНИЕ
БОЛЬШИМИ
СИСТЕМАМИ**

СБОРНИК ТРУДОВ

Выпуск 76

Москва – 2018

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ

Академики РАН: Васильев С.Н., Емельянов С.В., Куржанский А.Б., Федосов Е.А., Черноусько Ф.Л.; члены-корреспонденты РАН: Желтов С.Ю., Каляев И.А., Пархоменко П.П., Попков Ю.С.; д-ра техн. наук: Кузнецов О.П., Кульба В.В., Лотоцкий В.А., Павлов Б.В., Поляк Б.Т., Рутковский В.Ю.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: член-корр. РАН Новиков Д.А. **Зам. главного редактора:** д-р физ.-мат. наук Губко М.В. **Отв. секретарь:** канд. техн. наук Калимулина Э.Ю. **Редактор:** канд. техн. наук Квинто Я.И.

Д-ра техн. наук: проф. Алескеров Ф.Т. (ГУ ВШЭ), проф. Алчинов А.И. (ИПУ РАН), проф. Андриевский Б.Р. (ИПМ РАН), проф. Афанасьев В.Н. (МИЭМ), проф. Бахтадзе Н.Н. (ИПУ РАН), проф. Бурков В.Н. (ИПУ РАН), проф. Вишневский В.М. (ИПУ РАН), Галаев А.А. (ИПУ РАН), д-р физ.-мат. наук проф. Ерешко Ф.И. (ВЦ РАН), д-ра техн. наук Зоркальцев В.И. (ИСЭМ СО РАН), проф. Калашников А.О. (ИПУ РАН), проф. Калянов Г.Н. (ГУ ВШЭ), проф. Каравай М.Ф. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Клочков В.В. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук, Коргин Н.А. (ИПУ РАН), проф. Курдюков А.П. (ИПУ РАН), д-ра физ.-мат. наук, проф. Кушнер А.Г., проф. Лазарев А.А. (МФТИ), д-ра техн. наук: проф. Лебедев В.Г. (ИПУ РАН), проф. Мандель А.С. (ИПУ РАН), д-р биол. наук проф. Михальский А.И., д-р физ.-мат. наук, проф. Непейвода Н.Н. (ИПС РАН), д-р экон. наук, проф. Нижегородцев Р.М. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук: проф. Орлов А.И. (МГТУ), д-ра физ.-мат. наук: проф. Рапопорт Л.Б. (ИПУ РАН), проф. Райгородский А.М. (МГУ), проф. Савватеев А.В. (РЭШ), д-ра техн. наук: проф. Самуйлов К.Е. (РУДН), проф. Сидельников Ю.В. (МАИ), Совлуков А.С. (ИПУ РАН) д-ра физ.-мат. наук: проф. Соловьев С.Ю. (МГУ), проф. Угольницкий Г.А. (ЮФУ), проф. Уткин В.А. (ИПУ РАН), проф. Хоботов Е.Н. (МГТУ), д-ра физ.-мат. наук: доцент Чеботарев П.Ю. (ИПУ РАН), проф. Чхартишвили А.Г. (ИПУ РАН), проф. Щербаков П.С. (ИПУ РАН).

РЕГИОНАЛЬНЫЕ РЕДАКЦИОННЫЕ СОВЕТЫ

Арзамас – д-р физ.-мат. наук проф. Пакшин П.В. **Волгоград** – д-ра физ.-мат. наук: проф. Воронин А.А., проф. Лосев А.Г. (ВолГУ); **Воронеж** – д-р техн. наук, проф. Баркалов С.А., д-р физ.-мат. наук, проф. Головинский П.А. (ВГАСУ), д-р техн. наук, проф. Подвальный С.Л. (ВГТУ); **Иркутск** – академик РАН Бычков И.В., д-р физ.-мат. наук, проф. Лакеев А.В. (ИДСТУ СО РАН); **Казань** – д-р физ.-мат. наук, проф. Маликов А.И., д-р техн. наук, проф. Сиразетдинов Р.Т. (КГТУ-КАИ); **Липецк** – д-ра техн. наук: проф. Погодаев А.К., Сараев П.В. (ЛГТУ); **Самара** – д-ра экон. наук: проф. Богатырев В.Д., проф. Гераськин М.И., д-р техн. наук, проф. Засканов В.Г. (СГАУ); **Петрозаводск** – д-р физ.-мат. наук, проф. Мазалов В.В., д-р техн. наук, доц. Печников А.А. (ИПМИ КарНЦ РАН); **Санкт-Петербург** – д-р физ.-мат. наук: проф. Петросян Л.А. (СПбГУ), д-р техн. наук проф. Фуртат И.Б. (ИПМ РАН); **Старый Оскол** – д-р техн. наук, проф. Еременко Ю.И. (СТИ).

Адрес редакции: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

Адрес в интернете: ubs.mtas.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

Анализ и синтез систем управления

Краснова С.А.

*Оценивание производных внешних возмущений
на основе виртуальных динамических моделей* 6

Управление в социально-экономических системах

Абрамова Н.А., Коврига С.В., Порцев Р.Ю.

*О развитии рефлексивного подхода к анализу
обоснования субъективных управленческих решений
посредством когнитивного моделирования.....* 26

Ратнер С.В.

*Динамические модели экологического анализа среды
функционирования с переменными запаса и потока...* 69

Селезнева И.Е.

*Математическая модель процесса организации
системных исследований.....* 94

Белов М.В.

*Проблемы управления жизненными циклами
организационно-технических систем* 117

Управление в медико-биологических и экологических системах

Карпова И.П., Карпов В.Э.

*Агрессия в мире аниматов, или о некоторых
механизмах управления агрессивным поведением
в групповой робототехнике.....* 173

***Управление техническими системами
и технологическими процессами***

Бурков В.Н., Еналеев А.К., Строгонов В.И. <i>Модели и структура управления разработкой и внедрением инновационных средств и технологий (на примере железнодорожного транспорта). II. Модель механизма стимулирования энергоэффективности и элементы структуры управления проектами.....</i>	219
Базовкин А.В. <i>Об одном методе упорядочивания перечня геолого-технических мероприятий</i>	239
<hr/> <i>Технические и программные средства управления</i> <hr/>	
Мирошник С.Н., Гончар Д.Р. <i>Вычисление верхней оценки избыточности данных и ее использование при определении времени доступа модулей к БД в реальном времени</i>	254

ОЦЕНИВАНИЕ ПРОИЗВОДНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ¹

Краснова С. А.²

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва;

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва)

В рамках каскадного подхода к синтезу наблюдателей состояния и возмущений предложен оригинальный метод оценивания производных внешних возмущений на основе виртуальных динамических моделей, составленных путем последовательного дифференцирования части производных переменных состояния объекта управления, на которые действуют внешние возмущения, подлежащие оцениванию. Разработана процедура каскадного синтеза наблюдателей производных возмущений, которые строятся как реплики этих виртуальных моделей, с кусочно-линейными корректирующими воздействиями. В данной процедуре реализуется метод разделения движений в виртуальном пространстве ошибок наблюдения. Не только переменные наблюдателя, но и их корректирующие воздействия служат оценками производных внешних возмущений и могут быть использованы для синтеза комбинированной обратной связи и/или текущей диагностики процесса управления.

Ключевые слова: нелинейные системы, внешние возмущения, наблюдатели возмущений, каскадный подход, метод разделения движений.

1. Введение

Проблема обеспечения инвариантности по отношению к внешним возмущениям является актуальной задачей теории автоматического управления. Известны различные подходы к ее решению в рамках различных методов при конкретных предположениях о природе внешних возмущений и каналах их действия на объект управления. Одним из методов синтеза инвариантных систем является формирование комбинированного управления, которое состоит из двух частей. Первая часть – об-

¹ Работа частично поддержана грантом РФФИ 18-01-00846А.

² Светлана Анатольевна Краснова, д.т.н., профессор (skrasnova@list.ru).

ратная стабилизирующая связь по вектору состояния; вторая часть вводится для компенсации действия внешних согласованных возмущений, принадлежащих пространству управления, и производных внешних несогласованных возмущений в предположении об их гладкости. Такой подход предполагает использование в контуре обратной связи динамических моделей, служащих для получения текущих оценок внешних возмущений и их производных.

Наиболее разработанным в теории автоматического управления является метод синтеза инвариантных систем при наличии динамической модели, имитирующей действие внешних возмущений, и построение на ее основе динамического компенсатора или наблюдателя возмущений [1, 7–11, 13]. Реализация данного метода становится затруднительной, если в процессе эксплуатации характеристики внешних воздействий существенно меняются. Попытка априори предусмотреть все возможные вариации автономных моделей внешних воздействий, в которых изменению могут подлежать не только параметры, но и структура, может привести к недопустимому усложнению расширенной математической модели объекта управления и потребовать длительного машинного времени для выполнения вычислений в реальном времени. Другая альтернатива – разработка системы управления с учетом наихудших возмущений – может привести к неоправданно большому расходу ресурсов управления в штатной ситуации. Синтез эффективной системы управления требует привлечения специальных методов косвенного оценивания внешних возмущений и их производных в реальном времени.

В частном случае, когда параметры объекта управления известны и вектор состояния полностью измеряется, текущую информацию о внешних воздействиях можно получить, непосредственно оценивая их влияние на объект управления. Для этой цели можно использовать наблюдатель состояния с разрывными корректирующими воздействиями, функционирующий в скользящем режиме [2, 3, 16], или его допредельные реализации с непрерывными корректирующими воздействиями [4–6]. Такие наблюдатели, по сути, выполняют функции динамических дифференциаторов. Идея заключается в том, что с помощью

S -образных корректирующих воздействий обеспечивается стабилизация ошибок наблюдения и их производных с заданной точностью за конечное время, а корректирующие воздействия наблюдателя в установившемся режиме обрабатывают внешние ограниченные возмущения и дают их оценку. Этот подход в данной работе распространяется на решение задачи оценивания производных внешних возмущений любого требуемого порядка в предположении об их гладкости. Основой для построения соответствующих наблюдателей служат дифференциальные уравнения переменных состояния второго и более высокого порядка, в правые части которых входят старшие производные внешних возмущений.

Работа имеет следующую структуру. В разделе 2 описывается рассматриваемая модель нелинейного объекта управления, аффинная по внешним возмущениям. В разделе 3 представлен базовый метод синтеза наблюдателя состояния на основе этой модели, в рамках которого оценивание внешних возмущений осуществляется с помощью кусочно-линейных корректирующих воздействий наблюдателя. Основным результатом представлен в разделе 4. В рамках данного подхода разработан оригинальный метод оценивания производных внешних возмущений на основе виртуальных динамических моделей, составленных путем последовательного дифференцирования части производных переменных состояния объекта управления, на которые действуют внешние возмущения, подлежащие оцениванию. Сразу отметим, что данные динамические модели составляют аналитически, операция дифференцирования сигналов в реальном времени, которая весьма проблематична в практической реализации, не выполняется. Наблюдатели состояния строятся как реплики этих виртуальных моделей. В результате каскадного синтеза непрерывных, кусочно-линейных корректирующих воздействий наблюдателя реализуется метод разделения движений [10–11] в пространстве ошибок наблюдения. А именно, в каждом i -м блоке наблюдателя, построенном на основе виртуальной модели, полученной после i -го дифференцирования, используются оценки внешних возмущений и их производных до $(i - 1)$ -го порядка, полученные в предыдущих блоках, а оцениванию

с помощью корректирующих воздействий подлежат производные i -го порядка. Эти сигналы, в свою очередь, используются для формирования корректирующих воздействий в $(i + 1)$ -м блоке наблюдателя, где оцениванию подлежат производные внешних возмущений $(i + 1)$ -го порядка. Порядок виртуальной модели и соответствующего наблюдателя определяется потребностью в оценке старших производных внешних возмущений для целей управления и/или текущей диагностики.

В разделе 5 в качестве иллюстрации разработанных алгоритмов приведены результаты моделирования системы управления положением перевернутого маятника при действии внешнего, несогласованного возмущения с оцениванием его производной с помощью наблюдателя, составленного на основе виртуальной модели.

2. Описание модели объекта управления

Рассматривается математическая модель нелинейного объекта управления, аффинная по внешним возмущениям

$$(1) \quad \dot{x} = f(x, u) + Q(x)\eta,$$

где $x \in X \subset R^n$ – вектор состояния; X – открытая ограниченная рабочая область изменения переменных состояния; $u \in R^m$ – вектор управления; $\eta(t) \in R^p$ – вектор внешних возмущений, которые полагаются неизвестными гладкими функциями времени, ограниченными вместе со своими производными в общем случае до n -го порядка. Предполагается, что вектор состояния $x(t)$ полностью измеряется, шумы в измерениях отсутствуют, кроме того

$$(2) \quad \text{rank} Q(x) = \text{rank} Q_1(x) = p < n \quad \forall x \in X, \quad Q_{n \times p} = \begin{pmatrix} Q_{1(p \times p)} \\ Q_{2((n-p) \times p)} \end{pmatrix};$$

элементы вектор-функции $f(x, u)$ и матрицы $Q_1(x)$ известны и являются гладкими функциями, удовлетворяющими условиям Липшица, они и их производные в общем случае до n -го являются ограниченными в процессе управления, в частности

$$(3) \quad \|Q_1(x(t))\eta(t)\|_{\infty} \leq F_0, \quad \left\| \frac{d^i}{dt^i} Q_1(x)\eta(t) \right\|_{\infty} \leq F_{0i} \quad \forall t \geq 0,$$

где $F_0, F_{0i}, i = 1, \dots, n$, – известные константы, значения которых определяются из худшего допустимого случая с учетом цели и закона управления, а также особенностей среды функционирования объекта управления. Для простоты изложения основные результаты излагаются на основе оценок норм векторов. Без ограничения общности нижеследующие результаты можно применить для получения более точных покомпонентных оценок.

Цель и закон управления для системы (1) в данной работе не детализируются. Для текущей диагностики и/или формирования комбинированного управления ставится задача наблюдения компонент вектора внешних возмущений $\eta(t)$ и их производных в общем случае до ν -го порядка ($1 \leq \nu \leq n - 1$) путем оценивания их влияния непосредственно на объект управления. Расширение пространства состояний за счет ввода генератора внешних возмущений, имитирующих внешние возмущения, в рамках данных построений не предусмотрено.

В следующем разделе приводится базовый алгоритм оценивания внешних возмущений с построением динамического наблюдателя с кусочно-линейными корректирующими воздействиями на основе модели объекта управления (1).

3. Базовый алгоритм оценивания внешних возмущений при отсутствии генератора возмущений

Представим систему (1) с учетом (2) в виде двух подсистем

$$(4) \quad \begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x, u) + Q_1(x)\eta, \\ \dot{x}_2 &= f_2(x, u) + Q_2(x)\eta, \end{aligned}$$

где $\dim x_1 = \text{rank} Q_1(x) = p \quad \forall x \in X, \quad \dim x_2 = n - p$.

Полагая элементы векторов $x(t)$ и $u(t)$ известными функциями времени, для оценивания возмущений построим наблюдатель состояния на основе первой подсистемы системы (4) в виде

$$(5) \quad \dot{z}_0 = f_1(x, u) + v_0,$$

где $z_0, v_0 \in R^p$ – вектор состояния и вектор корректирующих воздействий наблюдателя соответственно. В силу (4)–(5) запишем систему относительно ошибок наблюдения

$$(6) \quad \varepsilon_0 = x_1 - z_0 \in R^p: \dot{\varepsilon}_0 = Q_1(x)\eta - v_0.$$

Идея заключается в том, чтобы с помощью корректирующих воздействий $v_0(\varepsilon_0)$, где $\varepsilon_0(t)$ – измеряемые сигналы, обеспечить в системе (6) стабилизацию и ошибок наблюдения, и их производных. Тогда в силу уравнений статики корректирующие воздействия будут обрабатывать внешние возмущения и служить их оценкой.

Как известно, наблюдатели с разрывными корректирующими воздействиями, функционирующие в скользящем режиме, решают эту задачу за конечное время [2, 3, 16]:

$$\varepsilon_0(t) = \dot{\varepsilon}_0(t) = 0 \quad t \geq t_0 > 0,$$

но в условиях ограниченности вычислительных ресурсов приводят к низкому качеству (негладкости) оцениваемых сигналов.

Новая парадигма заключается в использовании в наблюдателе (5) непрерывных, ограниченных S -образных корректирующих воздействий (в виде гладких сигма-функций $\sigma(x) = 2/(1 + e^{-kx}) - 1$ [4] или негладких sat-функций [5–6]), обеспечивающих, с одной стороны, лучшее качество восстановленных сигналов, но, с другой стороны, решение задачи оценивания с заданной точностью:

$$(7) \quad \|\varepsilon_0(t)\|_\infty \leq \delta_0, \quad \|\dot{\varepsilon}_0(t)\|_\infty \leq \delta_0 \Rightarrow v_0(t) \approx Q_1(x(t))\eta(t) \quad \forall t \geq t_0 > 0.$$

Используем в нижеследующих построениях простые в настройке S -образные, кусочно-линейные корректирующие воздействия вида $v_0 = M_0 \text{sat}(k_0 \varepsilon_0)$, где

$$\text{sat}(k_0 \varepsilon_0) = \text{col}(\text{sat}(k_0 \varepsilon_{01}), \dots, \text{sat}(k_0 \varepsilon_{0p})),$$

$$(8) \quad M_0 \text{sat}(k \varepsilon_{0i}) = \begin{cases} M_0 \text{sign } \varepsilon_{0i}, & |\varepsilon_{0i}| > 1/k_0, \\ M_0 k_0 \varepsilon_{0i}, & |\varepsilon_{0i}| \leq 1/k_0, \end{cases}$$

которые имеют два настраиваемых параметра: $M_0 = \text{const} > 0$ – амплитуда корректирующих воздействий, $k_0 = \text{const} > 0$ выполняет роль большого коэффициента [5, 6, 18].

Очевидно, что в замкнутой системе (6), (8) при конечных начальных условиях

$$1/k_0 < \|\varepsilon_0(0)\|_\infty < \infty$$

за конечное время $t_0 \geq 0$ ошибки наблюдения попадут в область

$$\|\varepsilon_0(t)\|_\infty \leq 1/k_0$$

при выполнении достаточного условия [2–6, 14]

$$(9) \quad \varepsilon_0^T \dot{\varepsilon}_0 = \varepsilon_0^T (Q_1(x)\eta - M \operatorname{sign} \varepsilon_0) \leq \|\varepsilon_0\| (F_0 - M) < 0 \Rightarrow M_0 > F_0,$$

а при $\|\varepsilon_0(0)\|_\infty \leq 1/k_0$, в частности при

$$z_0(0) = x_1(0) \Rightarrow \varepsilon_0(0) = 0,$$

не выйдут за ее границы.

При $\forall t \geq t_0$ динамика ошибок наблюдения и их производных описывается следующими уравнениями:

$$\dot{\varepsilon}_0 = Q_1(x)\eta - M_0 k_0 \varepsilon_0,$$

$$\ddot{\varepsilon}_0 = \frac{d}{dt} Q_1(x)\eta(t) - M_0 k_0 \dot{\varepsilon}_0.$$

С учетом (3) и данных уравнений из достаточных условий найдем нижнюю оценку для выбора большого коэффициента, при котором обеспечиваются оба неравенства (7) при уже выбранном на основе (9) значении амплитуды $M_0^* > F_0$:

$$\varepsilon_0^T \dot{\varepsilon}_0 \leq \|\varepsilon_0\| (F_0 - M_0^* k_0 \|\varepsilon_0\|) < 0,$$

$$\varepsilon_0^T \ddot{\varepsilon}_0 \leq \|\dot{\varepsilon}_0\| (F_{01} - M_0^* k_0 \|\dot{\varepsilon}_0\|) < 0 \Rightarrow$$

$$(10) \Rightarrow k_0^* > \frac{\max\{F_0, F_{01}\}}{M_0^* \delta_0}, \quad 0 < \delta_0 < 1/k_0^*.$$

Таким образом, с помощью корректирующих воздействий будут получены текущие оценки внешних возмущений за конечное время с заданной точностью:

$$(11) \quad \eta(t) \approx \bar{\eta}(t) = Q_1^{-1}(x(t))v_0(t) \quad \forall t \geq t_0,$$

$$\|\eta(t) - \bar{\eta}(t)\|_\infty \leq \|Q_1^{-1}(x(t))\|_\infty \delta_0 = \bar{\delta}_0.$$

Замечание 1. Если в системе (1) условие (2) не выполняется, а именно,

$$\operatorname{rank} Q_{n \times p} = \operatorname{rank} Q_{1(p_0 \times p)} = p_0 < p,$$

то задача покомпонентного оценивания вектора возмущений не

имеет решения. В этом случае аналогично с помощью наблюдателя (5), где $z_0, v_0 \in R^{p_0}$, решается задача оценивания линейных комбинаций внешних возмущений максимально возможного ранга:

$$v_0(t) \approx Q_1(x(t))\eta(t).$$

Замечание 2. При неполных измерениях вектора состояния $x(t)$ в рамках данного подхода можно решить задачу оценивания и неизмеряемых переменных состояния, и внешних возмущений, если они не сужают наблюдаемого пространства вектора состояния [2–6, 16].

Далее полученные оценки (11) используются для синтеза корректирующих воздействий наблюдателей состояния виртуальных моделей с целью восстановить текущие значения производных внешних возмущений в общем случае до v -го порядка, $1 \leq v \leq n - 1$.

В следующем разделе будет показано, что для обеспечения заданной точности оценивания производных возмущений до v -го порядка в базовом алгоритме следует обеспечить стабилизацию с заданной точностью не только первых, но и старших производных ошибок наблюдения ε_0 до $(v + 1)$ -го порядка путем соответствующего выбора коэффициента усиления. С учетом (3) из достаточных условий, аналогичных (10), с точностью до затухающих собственных движений старших производных имеем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0^{(i)T} \varepsilon_0^{(i+1)} &\leq \|\varepsilon_0^{(i)}\| (F_{0i} - M_0^* k_0 \|\varepsilon_0^{(i)}\|) < 0, \quad i = 2, \dots, v + 1, \Rightarrow \\ (12) \Rightarrow k_0^* &> \frac{\max\{F_0, F_{01}, \dots, F_{0,v+1}\}}{M_0^* \delta_0} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \|\varepsilon_0^{(i)}(t)\|_\infty \leq \delta_0 \quad \forall i = \overline{0, v+1}, \quad t \geq t_0. \end{aligned}$$

4. Каскадный синтеза наблюдателей производных внешних возмущений, построенных на основе виртуальных динамических моделей

Пусть для целей комбинированного управления требуются

оценки производных внешних возмущений в общем случае до v -го порядка, $1 \leq v \leq n - 1$. Покажем, что эту проблему можно решить с помощью динамических наблюдателей, построенных на основе виртуальных динамических моделей.

Для оценивания первых производных внешних возмущений за основу принимаются восстановленные выше сигналы (7)

$$y_1(t) = Q_1(x(t))\eta(t) \approx v_0(t),$$

которые полагаются виртуальным выходом для дальнейших построений в рамках задачи наблюдения производных внешних возмущений. Виртуальной динамической моделью будем называть полную производную указанного виртуального выхода, полученную, еще раз подчеркнем, путем аналитического, а не реального дифференцирования:

$$(13) \dot{y}_1 = H(x, u, \eta)\eta + Q_1(x)\eta_1,$$

где

$$\dot{\eta} = \eta_1 \in R^p, \quad H(x, u, \eta) = \frac{d}{dt} Q_1(x).$$

Далее аналогично будут использоваться обозначения

$$\dot{\eta}_i = \eta_{i+1} \in R^p, \quad i = 1, \dots, v.$$

В системе (13) при $t > t_0$ неизвестными являются только производные возмущений $\eta_1(t)$. В силу (11) для их оценивания построим наблюдатель как реплику виртуальной модели (13) в виде

$$(14) \dot{z}_1 = H(x, u, \bar{\eta})\bar{\eta} + v_1,$$

где $z_1, v_1 \in R^p$ – вектор состояния и вектор корректирующих воздействий наблюдателя соответственно. В силу (13)–(14) запишем систему относительно ошибок наблюдения

$$\varepsilon_1 = y_1 - z_1 \in R^p$$

в виде

$$(15) \dot{\varepsilon}_1 = \Delta H_1 + Q_1(x)\eta_1 - v_1, \quad v_1 = M_1 \text{sat}(k_1(v_0 - z_1)),$$

где элементы вектор-функции

$$\Delta H_1 = H(x, u, \eta)\eta - H(x, u, \bar{\eta})\bar{\eta}$$

согласно априорным предположениям удовлетворяют условию Липшица: $\|\Delta H_1\|_\infty \leq L_1 \bar{\delta}_0$.

При выполнении условий, аналогичных (3), (9), (12), а именно, если $\forall t \geq 0$ имеют место оценки

$$(16) \quad \|Q_1(x(t))\eta_1(t)\|_{\infty} \leq F_1,$$

$$\left\| \frac{d^i}{dt^i} (\Delta H_1(t) + Q_1(x)\eta_1(t)) \right\|_{\infty} \leq F_{1i}, i = 1, \dots, \nu,$$

то при выборе амплитуды корректирующих воздействий

$$(17) \quad M_1^* > L_1 \bar{\delta}_0 + F_1$$

ошибки наблюдения за конечное время попадают в область

$$\|\varepsilon_1(t)\|_{\infty} \leq \delta_0 + 1/k_1,$$

где сдвиг на δ_0 обусловлен выражениями (6), (7), (12):

$$(18) \quad v_0 = y_1 - \dot{\varepsilon}_0 \Rightarrow v_0 - z_1 = \varepsilon_1 - \dot{\varepsilon}_0.$$

Таким образом, корректирующее воздействие (15) и его производные в указанной области представимы в виде

$$v_1 = M_1 \text{sat}(k_1(\varepsilon_1 - \dot{\varepsilon}_0)), v_1^{(i)} = M_1 k_1 (\varepsilon_1^{(i)} - \varepsilon_0^{(i+1)}), i = \overline{0, \nu},$$

а выбор большого коэффициента на основе неравенства

$$(19) \quad k_1^* > \frac{\max\{L_1 \bar{\delta}_0 + F_1, F_{11}, \dots, F_{1\nu}\}}{M_1^* \delta_1}, \quad 0 < \delta_1 < 1/k_1^*$$

обеспечит попадание ошибок наблюдения системы (15) и их производных в область

$$\|\varepsilon_1^{(i)}(t)\|_{\infty} \leq \delta_0 + \delta_1 \quad \forall i = \overline{0, \nu}, \quad \forall t \geq t_1 > t_0,$$

$$\|Q_1(x)\eta_1 - v_1\| = \|\dot{\varepsilon}_1(t) - \Delta H_1\|_{\infty} \leq \delta_0 + \delta_1 + L_1 \bar{\delta}_0 \Rightarrow$$

$$(20) \quad v_1(t) \approx Q_1(x(t))\eta_1(t).$$

Таким образом, с помощью корректирующих воздействий (15) имеем текущие оценки первых производных внешних возмущений:

$$(21) \quad \eta_1(t) \approx \bar{\eta}_1(t) = Q_1^{-1}(x(t))v_1(t),$$

$$\|\eta_1(t) - \bar{\eta}_1(t)\|_{\infty} \leq \|Q_1^{-1}(x(t))\|_{\infty} (\delta_0 + \delta_1 + L_1 \bar{\delta}_0) = \bar{\delta}_1.$$

Замечание 3. В рамках данных построений в текущих оценках внешних возмущений (11) и их производных (21) фигурируют непосредственно измеряемые сигналы $v_0(x_1(t) - z_0(t))$, $v_1(v_0(t) - z_1(t))$, что требует высокого качества измерений $x(t)$ или

их предварительной фильтрации при наличии шумов в каналах измерений. Этот недостаток, присущий любым наблюдателям пониженной размерности, которые требуют высокого качества оценивания и точного знания параметров объекта управления [14, 17], можно частично обойти при построении полноразмерного наблюдателя, а именно, для оценивания линейной комбинации внешних возмущений использовать сигнал наблюдателя (14):

$$\varepsilon_1(t) = y_1(t) - z_1(t) \approx \vec{0} \Rightarrow z_1(t) \approx Q_1(x(t))\eta(t) \quad \forall t \geq t_1,$$

$$(22) \quad \|z_1(t) - Q_1(x(t))\eta(t)\|_\infty \leq \delta_0 + \delta_1.$$

Точность оценивания (22) будет хуже по сравнению с (11), где $\|v_0 - Q_1(x)\eta\|_\infty \leq \delta_0$, но в силу фильтрующих свойств динамической подсистемы (14) можно ожидать лучшего качества (гладкости) восстановленных сигналов. Следует отметить, что использование наблюдателя (14) для получения оценок внешних возмущений (22) соответствует схеме построения расширенного наблюдателя Халила [15]. Отличие состоит в том, что в наблюдателе Халила используются глубокие обратные связи, а в нашем случае используются всюду ограниченные корректирующие воздействия, которые не порождают перерегулирование. Кроме того, наблюдатель (14) выполняет двойную функцию: его переменные дают оценку линейной комбинации внешних возмущений (22), а корректирующие воздействия служат оценкой линейной комбинации первых производных возмущений.

Указанные построения последовательно повторяются для оценивания старших производных возмущений. Так, для оценивания вторых производных аналогично на основе виртуального выхода $y_2 = Q_1\eta_1$ составляем виртуальную динамическую модель

$$(23) \quad \dot{y}_2 = H(x, u, \eta)\eta_1 + Q_1(x)\eta_2,$$

соответствующий наблюдатель

$$(24) \quad \dot{z}_2 = H(x, u, \bar{\eta})\bar{\eta}_1 + v_2$$

и систему относительно ошибок наблюдения

$$(25) \quad \varepsilon_2 = y_2 - z_2 \in R^p : \dot{\varepsilon}_2 = \Delta H_2 + Q_1(x)\eta_2 - v_2,$$

где

$$\Delta H_2 = H(x, u, \eta)\eta_1 - H(x, u, \bar{\eta})\bar{\eta}_1, \|\Delta H_2\|_\infty \leq L_{21}\bar{\delta}_0 + L_{22}\bar{\delta}_1.$$

С помощью кусочно-линейных корректирующих воздействий $v_2 = M_2 \text{sat}(k_2(v_1 - z_2))$, где $y_2 \approx v_1$ (20), при выполнении условий, аналогичных (16)–(19), $\forall t \geq t_2 > t_1$ обеспечивается сходимость переменных состояния системы (25) и их производных в область

$$\|\mathcal{E}_2^{(i)}(t)\|_\infty \leq \delta_0 + \delta_1 + \delta_2 \quad (0 < \delta_2 < 1/k_2^*) \quad \forall i = 0, \dots, \nu - 1,$$

$$\begin{aligned} \|Q_1(x)\eta_2 - v_2\| &= \|\dot{\mathcal{E}}_2(t) - \Delta H_2\|_\infty \leq \\ &\leq \delta_0 + \delta_1 + \delta_2 + L_{21}\bar{\delta}_0 + L_{22}\bar{\delta}_1 \Rightarrow v_2(t) \approx Q_1(x(t))\eta_2(t). \end{aligned}$$

Как следствие, при $\forall t \geq t_2$ имеем альтернативный по отношению к (20) вариант оценивания линейных комбинаций первых производных возмущений в виде

$$z_2(t) \approx y_2(t) = Q_1(x)\eta_1, \|z_2 - Q_1(x)\eta_1\|_\infty \leq \delta_0 + \delta_1 + \delta_2$$

(см. замечание 3), а также текущие оценки вторых производных возмущений

$$(26) \quad \eta_2(t) \approx \bar{\eta}_2(t) = Q_1^{-1}(x(t))v_2(t), \|\eta_2(t) - \bar{\eta}_2(t)\|_\infty \leq \\ \leq \|Q_1^{-1}(x(t))\|_\infty (\delta_0 + \delta_1 + \delta_2 + L_{21}\bar{\delta}_0 + L_{22}\bar{\delta}_1) = \bar{\delta}_2,$$

и т.д. Оценки (11), (21), (26) следует учитывать при назначении точности оценивания $0 < \delta_i < 1/k_i^*$, $i = 0, \dots, \nu$ на каждом i -м шаге.

Итак, для оценивания внешних возмущений и их производных до ν -го порядка потребуется наблюдатель (5) и ν наблюдателей типа (14), (24). Эти наблюдатели, по сути, являются дифференциаторами, т.е. восстанавливают текущие значения правых частей соответствующих дифференциальных уравнений при условии их ограниченности. Еще раз отметим, что в рамках данных построений реальное дифференцирование сигналов не выполняется.

Процедура синтеза подсистемы наблюдения декомпозируется на независимо решаемые элементарные подзадачи в каждом блоке размерности p , а параметры кусочно-линейных корректирующих воздействий выбираются на основе неравенств.

Еще раз подчеркнем, что данный подход не требует расширения пространства состояний и составления реальных динамических моделей внешних возмущений. Виртуальные динамические модели типа (13), (23) используются только как основа для построения наблюдателей состояния и не вводятся в контур обратной связи.

Для реализации разработанного подхода достаточно худших оценок на диапазоны изменения составляющих объекта управления, внешних возмущений и их производных, которые могут быть получены из предметных соображений.

5. Пример

Для иллюстрации разработанного метода рассмотрим задачу управления угловым положением перевернутого маятника при действии внешнего возмущения. С учетом динамики исполнительного устройства имеем следующую математическую модель объекта управления [6, 12]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ (27) \quad \dot{x}_2 &= a_{21} \sin x_1 - a_{22} x_2 + a_{23}(x_3 + \eta), \\ \dot{x}_3 &= -a_{32} x_2 - a_{33} x_3 + b_3 u, \end{aligned}$$

где x_1 [рад] – угловое положение маятника (регулируемая переменная); x_2 [рад/с] – угловая скорость; x_3 [Нм] – вращающий момент, приложенный к маятнику на оси подвеса, который развивается исполнительным устройством с непрерывным управлением u ; $a_{21} = \bar{g}/l$, $a_{22} = \kappa/l$, $a_{23} = 1/(ml^2)$, $\bar{g} = 9,8$ [м/с²] – ускорение свободного падения; m [кг], l [м] – известные масса и длина маятника соответственно; κ [Па·с] – известный коэффициент вязкого трения; a_{32} , a_{33} , b_3 – известные положительные коэффициенты передачи; $\eta(t)$ – неизвестная функция времени, которая характеризует действие внешних, ограниченных возмущений с ограниченными производными

$$|\eta(t)| \leq F_0, \quad |\dot{\eta}(t)| \leq F_1, \quad |\ddot{\eta}(t)| \leq F_2 \quad t \geq 0.$$

Все переменные состояния системы (27) подлежат прямым измерениям, шумы в измерениях отсутствуют.

Ставится задача синтеза комбинированного управления по обратной связи, обеспечивающего слежение выходной переменной $x_1(t)$ за заданной, допустимой траекторией $g(t)$; $g(t)$, $\dot{g}(t)$, $\ddot{g}(t)$, $\ddot{\ddot{g}}(t)$ – известные ограниченные функции времени, которые заданы аналитически либо порождаются динамическим генератором задающих воздействий [1, 9].

Для решения поставленной задачи представим систему (27) в канонической форме «вход–выход» [6, 16] относительно ошибки слежения $e_1 = x_1 - g$ и ее производной $e_2 = \dot{x}_2 - \dot{g}$:

$$(28) \quad \dot{e}_1 = e_2, \dot{e}_3 = e_3,$$

$$\dot{e}_3 = \psi(x, t) + bu, \quad b = a_{23}b_3 \neq 0,$$

где $e_3 = a_{21} \sin x_1 - a_{22}x_2 + a_{23}(x_3 + \eta) - \ddot{g}$,

$$\psi = a_{21}x_2 \cos x_1 - a_{22}(e_3 + \ddot{g}) - a_{23}(a_{32}x_2 + a_{33}x_3 - \dot{\eta}) - \ddot{\ddot{g}},$$

и сформируем базовый закон комбинированного управления в виде

$$(29) \quad u = -(\psi(x, t) + l_1 e_1 + l_2 e_2 + l_3 e_3) / b,$$

где $l_i = \text{const} > 0$ – коэффициенты гурвицева полинома.

Замкнутая система (28)–(29)

$$\dot{e}_1 = e_2, \quad \dot{e}_2 = e_3, \quad \dot{e}_3 = -l_1 e_1 - l_2 e_2 - l_3 e_3$$

устойчива, в ней обеспечивается асимптотическая сходимость к нулю ошибки слежения: $\lim_{t \rightarrow +\infty} e_1(t) = 0$.

Для реализации базового закона управления (29) нужно получить оценки внешнего возмущения $\eta(t)$ и его первой производной $\dot{\eta}(t)$.

Вначале для оценивания внешнего возмущения $\eta(t)$ построим наблюдатель как реплику второго уравнения системы (27) в виде

$$(30) \quad \dot{z}_0 = a_{21} \sin x_1 - a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + v_0$$

и запишем систему относительно ошибки наблюдения

$$\varepsilon_0 = x_2 - z_0 : \dot{\varepsilon}_0 = a_{23}\eta - v_0.$$

Выбор параметров кусочно-линейного корректирующего воздействия $v_0 = M_0 \text{sat}(k_0 \varepsilon_0)$ на основе неравенств, аналогичных (9), (12), а именно,

$$M_0^* > a_{23}F_0, \quad k_0^* > \frac{\max\{F_0, F_1, F_2\}}{M_0^* \delta_0}, \quad 0 < \delta_0 < 1/k_0^*$$

обеспечит стабилизацию ошибки наблюдения и ее производной (7) и позволит получить за конечное время с заданной точностью оценку внешнего возмущения

$$(31) \quad |a_{23}\eta(t) - v_0(t)| = |\dot{\varepsilon}_0(t)| \leq \delta_0 \quad \forall t \geq t_0.$$

Теперь для виртуального выхода $y_1 = a_{23}\eta$ составим виртуальную динамическую модель $\dot{y}_1 = a_{23}\dot{\eta}$, на ее основе построим наблюдатель состояния

$$(32) \quad \dot{z}_1 = v_1, \quad v_1 = M_1 \text{sat}(k_1(v_0 - z_1)), \quad y_1 \approx v_0$$

и запишем систему относительно ошибки наблюдения

$$\varepsilon_1 = y_1 - z_1: \quad \dot{\varepsilon}_1 = a_{23}\dot{\eta} - v_1.$$

Выбор параметров корректирующего воздействия v_1 в виде, аналогичном (17), (19), а именно

$$M_1^* > a_{23}F_1, \quad k_1^* > \frac{a_{23} \max\{F_1, F_2\}}{M_1^* \delta_1}, \quad 0 < \delta_1 < 1/k_1^*,$$

обеспечит стабилизацию ошибки наблюдения и ее производной и позволит получить за конечное время с заданной точностью оценку производной возмущения

$$(33) \quad |a_{23}\dot{\eta}(t) - v_1(t)| = |\dot{\varepsilon}_1(t)| \leq \delta_0 + \delta_1 \quad \forall t \geq t_1 > t_0.$$

Полученные оценки (31), (33) используются в законе управления (28) для формирования переменных $e_3(t)$, $\psi(t)$:

$$(34) \quad \begin{aligned} e_3(t) &= a_{21} \sin x_1(t) - a_{22}x_2(t) + a_{23}x_3(t) + v_0(t) - \ddot{g}(t), \\ \psi(t) &= a_{21} \cos x_1(t) \cdot x_2(t) - a_{22}(e_3(t) + \ddot{g}(t)) - \\ &\quad - a_{23}(a_{32}x_2(t) + a_{33}x_3(t)) + v_1(t) - \ddot{g}(t). \end{aligned}$$

Моделирование замкнутой системы (27), (29), (30), (32), (34) проводилось в среде Matlab Simulink при следующих параметрах:

$$\begin{aligned} a_{32} &= 2, \quad a_{33} = 10, \quad b_3 = 10, \quad m = 1, \quad l = 1, \quad \kappa = 8, \quad x_i(0) = 1, \\ z_0(0) &= x_2(0) \Rightarrow \varepsilon_0(0) = 0, \\ g &= \sin(0,5t), \quad \eta(t) = 0,5 \sin 2t, \quad l_1 = 125, \quad l_2 = 75, \quad l_3 = 15, \\ M_0^* &= 2, \quad M_1^* = 2, \quad k_0^* = 100, \quad k_1^* = 50. \end{aligned}$$

Результаты моделирования подтвердили эффективность разработанного подхода к оцениванию внешних возмущений и их производных. На рис. 1–2 показаны графики внешнего возмущения $a_{23}\eta(t)$, его производной $a_{23}\dot{\eta}(t)$ и соответствующих ошибок оценивания $a_{23}\eta(t) - v_0(t)$, $a_{23}\dot{\eta}(t) - v_1(t)$.

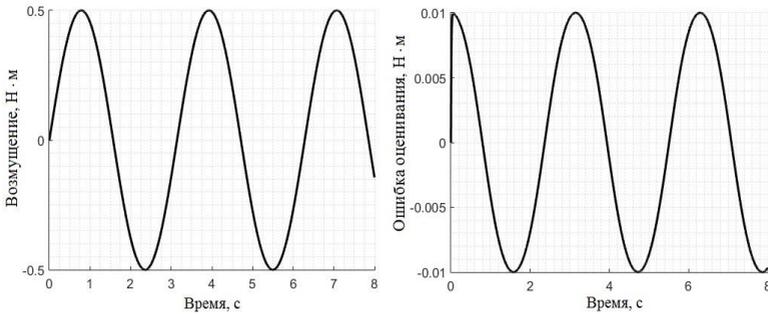


Рис. 1. Графики $a_{23}\eta(t)$ и $a_{23}\eta(t) - v_0(t)$

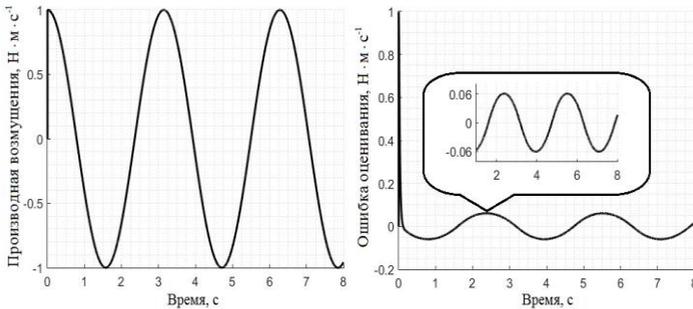


Рис. 2. Графики $a_{23}\dot{\eta}(t)$ и $a_{23}\dot{\eta}(t) - v_1(t)$

Как видно из графиков, имеют место следующие оценки:

$$(35) \quad |a_{23}\eta(t) - v_0(t)| \leq 0,01 \quad \forall t \geq 0,$$

$$|a_{23}\dot{\eta}(t) - v_1(t)| \leq 0,06 \quad \forall t \geq 0,1 \text{ [с]}.$$

На рис. 3 представлены графики углового положения маятника $x_1(t)$, заданной траектории $g(t)$ и ошибки слежения $e_1(t) = x_1(t) - g(t)$.

Как видим, для ошибки слежения имеет место следующая оценка

$$|e_1(t)| \leq 0,01 \text{ [рад]} \quad \forall t \geq 2 \text{ [с]},$$

которая обусловлена ошибками оценивания (35).

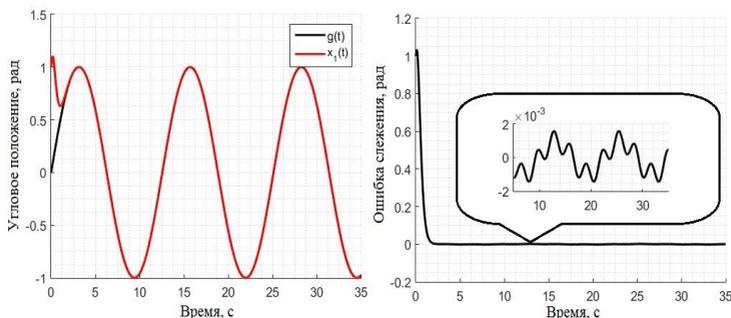


Рис. 3. Графики $x_1(t)$, $g(t)$ и $e_1(t)$

Замечание 4. В рамках данного подхода мы могли использовать другой вариант информационного обеспечения базового закона комбинированного управления (29) [6, 16]. А именно, непосредственно получить оценки переменных $e_3(t)$, $\psi(t)$ с помощью наблюдателя с кусочно-линейными корректирующими воздействиями, построенного на основе второго и третьего уравнения системы (28):

$$(36) \quad \dot{z}_2 = z_3 + v_2, \quad v_2 = M_2 \text{sat}(k_2(e_2 - z_2)),$$

$$\dot{z}_3 = bu + v_3, \quad v_3 = M_3 \text{sat}(k_3(v_2 - z_3)).$$

При соответствующем выборе параметров корректирующих воздействий обеспечивается стабилизация с заданной точностью ошибок наблюдения

$$\varepsilon_2 = e_2 - z_2, \quad \varepsilon_3 = e_3 - z_3$$

и их производных

$$\dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon_3 - v_2, \quad \dot{\varepsilon}_3 = \psi(x, t) - v_3,$$

что позволяет получить за конечное время последовательно оценки

$$e_3(t) \approx z_3(t), \quad \varepsilon_2(t) \approx v_2(t), \quad \psi(t) \approx v_3(t)$$

и реализовать закон управления (29) в виде

$$u = -(v_3 + l_1 e_1 + l_2 e_2 + l_3 z_3) / b.$$

В этом случае структура регулятора упрощается, но возникают определенные трудности с получением оценок области изменения переменных $\varepsilon_3(t)$, $\psi(t)$, $\dot{\psi}(t)$, необходимых для настройки параметров наблюдателя (36).

Литература

1. АНДРЕЕВ Ю.Н. *Управление конечномерными линейными объектами*. – М.: Наука, 1976. – 424 с.
2. КРАСНОВА С.А. *Каскадный синтез наблюдателя состояния для нелинейных систем при наличии внешних возмущений* // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №1. – С. 3–26.
3. КРАСНОВА С.А., КУЗНЕЦОВ С.И. *Оценивание на скользких режимах неконтролируемых возмущений в нелинейных системах* // Автоматика и телемеханика. – 2005. – №10. – С. 54–69.
4. КРАСНОВА С.А., УТКИН А.В. *Сигма-функция в задачах синтеза наблюдателей состояний и возмущений* // Проблемы управления. – 2015. – №5. – С. 27–36.
5. КРАСНОВА С.А., УТКИН В.А., УТКИН А.В. *Блочный подход к анализу и синтезу инвариантных нелинейных систем слежения* // Автоматика и телемеханика. – 2017. – №12. – С. 26–53.
6. КРАСНОВ Д.В., УТКИН А.В. *Синтез многофункциональной системы слежения в условиях неопределенности* // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 69. – С. 29–49.
7. МАЛИКОВ А.И. *Синтез наблюдателей состояния и неизвестных входов для нелинейных липшицевых систем с неопределенными возмущениями* // Автоматика и телемеханика. – 2018. – №3. – С. 21–43.
8. НИКИФОРОВ В.О. *Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений*. – СПб.: Наука, 2003. – 282 с.

9. УОНЕМ У.М. *Линейные многомерные системы управления. Геометрический подход.* – М.: Наука, 1980. – 376 с.
10. УТКИН В.А., УТКИН В.И. *Метод разделения движений в задачах инвариантности* // Автоматика и телемеханика. – 1983. – № 12. С. 39–48.
11. ЮРКЕВИЧ В.Д. *Расчет и настройка регуляторов для нелинейных систем с разнотемповыми процессами* // Автоматика. – 2012. – Т. 48, №5. – С. 24–31.
12. ANGELI D. *Almost global stabilization of the inverted pendulum via continuous state feedback* // Automatica. – 2001. – Vol. 37. – P. 1103–1108.
13. DAROUACH M., BOUTAT-BADDAS L., ZERROUGUI M. *H0-observer design for a class of Nonlinear singular systems* // Automatica. – 2011. – Vol. 47, No. 11. – P. 2517–2525.
14. DELSHAD S.S., JOHANSSON A., DAROUACH M., GUSTAFSSON T. *Robust state estimation and unknown inputs Reconstruction for a class of nonlinear systems: multiobjective approach* // Automatica. – 2016. – Vol. 64. – P. 1–7.
15. KHALIL H.K., PRALY L. *High-gain observers in nonlinear feedback control* // Int. Journal Robust and Nonlinear Control. – 2014. – Vol. 24. – P. 993–1015.
16. KRASNOVA S.A., UTKIN A.V. *Analysis and synthesis of minimum phase nonlinear SISO systems under external unmatched perturbations* // Automation and Remote Control. – 2016. – Vol. 77, No. 9. – P. 1665–1675 (Рус.: КРАСНОВА С.А., УТКИН А.В. Анализ и синтез минимально-фазовых нелинейных SISO-систем при действии внешних несогласованных возмущений // Проблемы управления. – 2014. – №6. – С. 22–30).
17. LUENBERGER D.B. *Observers of multivariable systems* // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1966. – Vol. AC-11. – P. 190–197.
18. TEEL A.R. *A nonlinear small gain theorem for the analysis of control systems with saturation* // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1996. – No. 41. – P. 1256–1270.

ESTIMATION OF EXTERNAL DISTURBANCES DERIVATIVES BASED ON VIRTUAL DYNAMIC MODELS

Svetlana Krasnova, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Bauman Moscow State Technical University, Doc.Sc., Professor, Chief Researcher (skrasnova@list.ru).

Abstract: The method of synthesis of invariant systems in the presence of a dynamic model, that simulates the effect of external disturbances, and the construction on its basis of a dynamic compensator or disturbances observer, is most developed in the theory of automatic control. An alternative method for estimating external influences that does not require the extension of the state space is to use state observers with discontinuous corrective actions functioning in the sliding mode or their continuous analogues. Within the framework of this approach, the original method for estimating the derivatives of external disturbances based on virtual dynamic models composed by sequential differentiation of a part of the derivative of state variables of the control plant, to which the estimated disturbances acting, is proposed. Virtual models are not introduced into the regulator, only dynamic observers of disturbances derivatives are present in the feedback loop. Observers are built as replicas of virtual models. Procedure for cascade synthesis of observers of disturbances derivatives with piecewise linear correcting actions is developed. In this procedure, the motions separation method in virtual space of observation errors is realized. And observer's variables, and their corrective actions, serve as estimates of the derivatives of external disturbances, and they can be used to synthesize combined feedback and/or current diagnostics of the control process.

Keywords: nonlinear systems, external disturbances, disturbances observers, cascade approach, motion separation method.

УДК 62.50

ББК 32.817

DOI: 10.25728/ubs.2018.76.1

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии В.А. Уткиным.*

Поступила в редакцию 11.05.2018.

Опубликована 30.11.2018.

О РАЗВИТИИ РЕФЛЕКСИВНОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ОБОСНОВАНИЯ СУБЪЕКТИВНЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ¹

Абрамова Н. А.², Коврига С. В.³, Порцев Р. Ю.⁴

(ФГБУН Институт проблем управления им.

В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Развивается рефлексивный подход к анализу обоснования управленческих решений по выходу из проблемных ситуаций со многими причастными сторонами, обобщающий практику такого анализа. В основе подхода лежит использование когнитивных карт специальных видов, которые названы рефлексивными в силу стимулирования процессов рефлексии, и разных методов верификации, использующих рефлексю. Подход реализован в виде методики, адаптируемой к разным постановкам управленческих задач. Методика подерживается языками рефлексивных карт и графоаналитическими методами и приемами анализа, которые реализованы в авторской технологии когнитивного моделирования. Работоспособность методики демонстрируется на двух прикладных примерах, различающихся по виду постановки управленческих задач. Определены некоторые направления дальнейшего развития подхода.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, многосубъектная ситуация, причастная сторона, обоснование управленческих решений, рефлексивный подход, рефлексивная когнитивная карта.

1. Введение. Краткий обзор подходов, связанных с рефлексией, в когнитивном моделировании

В последние два десятилетия появляется все больше публикаций, как теоретических, так и прикладных, относящихся к когнитивным картам и когнитивному моделированию. Прикладная ниша когнитивного моделирования охватывает сложные и слабоструктурированные, часто междисциплинарные ситуации

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 14-07-00961).

² Нина Александровна Абрамова, д.т.н. (abramova@ipu.ru).

³ Светлана Вадимовна Коврига, н.с. (kovriga@ipu.ru).

⁴ Руслан Юрьевич Порцев, м.н.с. (poruss@mail.ru).

и системы (социально-экономические, производственно-рыночные и др.), для характеристики которых широко используются качественные («мягкие»), нередко – высоко абстрактные понятия и экспертные оценки. Сюда же относятся сравнительно новые ситуации, для которых характерна нехватка опыта как в самих ситуациях, так и в их оценивании.

Традиционным для когнитивного моделирования является решение задач с использованием когнитивных карт, которые по умолчанию представляют проблемную ситуацию с точки зрения одного субъекта.¹ (Субъектами считаются как отдельные персоны, так и коллективные субъекты профессиональной деятельности, например, те или иные организационные структуры.) При этом человек, читающий карту, будь то ее составитель или кто-то другой, обычно воспринимает карту как объективное описание действительности (если только у него не возникают сомнения в адекватности описания) – составитель карты и относительность его представлений о мире не включаются в структуру понимания карты.

Но нередко с объективной проблемной ситуацией связаны субъекты с различающимися интересами и/или с различающимся пониманием ситуации. Для именования таких субъектов ГОСТы последних лет (ГОСТ Р 51897-2002, ГОСТ Р 51897-2011, ГОСТ Р ИСО 9241-210-2012) рекомендуют термин «причастная сторона» (stakeholder), вопреки более распространенному и более узкому термину «заинтересованная сторона»². Эта

¹ В таком традиционном понимании, когнитивная карта ситуации – это формализованная модель ситуации, отражающая знания (и/или верования) субъекта о причинно-следственных влияниях между значимыми факторами ситуации. Многие специалисты субъективный аспект игнорируют, тогда как другие, наоборот, выделяют.

² Согласно ГОСТам, в частности ГОСТ Р 51897-2002(2011), «причастная сторона (stakeholder) – любой индивидуум, группа или организация, которые могут воздействовать на риск, подвергаться воздействию или ощущать себя подверженными воздействию риска». Вводятся уточняющие примечания: «лицо, принимающее решение, также является причастной стороной»; «причастная сторона включает в себя заинтересованную сторону, но имеет более широкое значение, чем заинтересованная сторона».

работа основана на более общем термине «причастная сторона» с уточнением аспектов причастности, когда необходимо.

В когнитивном моделировании учёт различных субъектов, в том или ином аспекте причастных моделируемой ситуации, привел к выделению подходов, которые так или иначе связаны с рефлексией. При этом под рефлексией, следуя В. Лефевру [14, 15], мы понимаем такие формы мышления, когда «на планшете сознания» некоторого субъекта помимо рассматриваемой ситуации (или иного предмета мышления) отражаются представления и знания этого субъекта о самом себе и/или других субъектах, вовлеченных в рассматриваемую ситуацию, и их знаниях и представлениях о ситуации.

Наиболее развит на сегодня *подход на основе коллективных когнитивных карт* [10, 16, 24, 26–31], которые называют также социальными когнитивными картами, или групповыми, или коллективными каузальными картами и т.п.¹. В дальнейшем будем пользоваться первым названием и говорить коротко о подходе 1.

Этот подход относится к таким многосубъектным ситуациям, когда, несмотря на наличие разного понимания ситуации и/или интересов у разных субъектов, ситуация является для них объективно общей и, как предполагается, требует общих управленческих решений.

Суть идеи коллективных когнитивных карт состоит в формировании «единого», «обобщенного» взгляда определенного сообщества на общую для него проблемную ситуацию с представлением этого взгляда в виде когнитивной карты. При этом имеется в виду, что коллективная карта, которая выступает в качестве модели знаний некоторого сообщества о ситуации, – это «обычная» когнитивная карта того или иного формального типа (в зависимости от выбора авторов). Существенно, что отдельные носители знаний о ситуации или иные причастные стороны формально не различимы в карте. Здесь под «обычной» когнитивной картой подразумевается модельное представление

¹ Различие названий во многом связано с независимостью источников общей идеи и ее обоснований.

некоторой ситуации в виде множества факторов-переменных, связанных причинно-следственными влияниями, при возможности различных формальных интерпретаций (иными словами, типов) таких моделей.

Как можно заметить, согласно названному подходу оказывается, что обычные, судя по их языку, когнитивные карты могут быть коллективными *по построению*, а атрибут «коллективная» (или социальная, групповая) фактически относится только к процессу построения карты, но не к ее форме (языку).

И действительно, основной поток работ, полностью или частично относящихся к коллективным когнитивным картам разных типов [10, 16, 24, 26–31], в значительной мере посвящен подходам и методам агрегирования знаний и представлений отдельных субъектов, в результате которых возникает коллективная карта, при широком разнообразии исходных условий, допущений, эвристических идей¹.

При этом по умолчанию считается, что коллективное знание существует и может быть найдено, несмотря на то, что, как следует из обзора [26], вопрос о том, что представляет собой такое общее знание, остается открытым, и «отсутствует консенсус относительно теоретической основы общего знания (shared knowledge)», причем не только в области когнитивного моделирования, но и в более широком плане. Добавим, что остается открытым вопрос, как коллективное знание соотносится со знаниями отдельных причастных сторон, в том числе экспертов.

Основная роль рефлексии при использовании подхода 1 для решения прикладных задач относится к процессу составления коллективной карты путем агрегирования разных знаний и представлений о ситуации у причастных субъектов, представляющих моделируемое сообщество. Представляется уместным считать, что рефлексия должна иметь место в таком процессе в силу неизбежного разведения в сознании составителей карты собственно ситуации и привлекаемых знаний и представлений о ней у отдельных субъектов.

¹ Более детальный обзор этого подхода выходит за рамки этой работы.

Иначе говоря, уместно ожидать, что ответственный составитель коллективной карты или иной субъект, участвующий в ее составлении, например, эксперт, занимает рефлексивную позицию по отношению к рассматриваемой ситуации и представлениям о ней у отдельных субъектов. Лишь после того как коллективная карта построена, характерным оказывается отказ от рефлексивной позиции: при последующем использовании карта осознается просто как объективное описание ситуации, а не знание о ней определенного сообщества.

Несмотря на естественную роль рефлексии в человеческом процессе построения коллективной карты, при самых разных идеях и методах формальной и неформальной поддержки этого процесса в подходе 1, наличие рефлексии и учет ее влияния на качество конечных результатов в публикациях этого подхода, как правило, отсутствует; тем более отсутствует намеренное привлечение идей или техник рефлексии, как и предложения по поддержке качества рефлексивных процессов.

В лучшем случае наличие рефлексии при построении коллективной карты просто осознается и декларируется специалистами по когнитивному моделированию, как в [16], или же декларируется необходимость кооперации когнитивного моделирования с моделями рефлексии в духе Лефевра, как в [13].

Исключение составляет недавнее исследование [24], относящееся к многосубъектным ситуациям типа «заказчики–исполнители». В нем в качестве основной практической трудности при построении общей когнитивной карты выделяется *проблема взаимопонимания причастных сторон* с разными целями и компетентностями, вплоть до субъективности понятий, требующей минимизации, и предлагаются некоторые решения, включая валидацию и намеренное вовлечение рефлексии для разрешения проблемы. Для поддержки такой рефлексии предлагается коллективное обучение основам рефлексии и специальные приемы.

Уточним, что, как правило, разработчики методов построения коллективных карт, в отличие от [24], по умолчанию исходят из ограничивающего допущения об аддитивности систем ключевых понятий и, более широко, о единстве языка у при-

частных сторон, играющих разные роли в ситуации, тем самым, исключая проблему взаимопонимания сторон.

Известна также методология [31], которая при построении коллективной карты исходит из наличия различий в системах ключевых понятий экспертов и предполагает процедуру их согласования с применением формализованных критериев близости. Однако мотивация таких критериев представляется сомнительной с учетом практики¹.

Альтернативным к подходу 1 является *подход для конфликтных ситуаций* – подход 2, характерными работами в котором являются [12, 19]. Согласно этому подходу, формализованная модель знаний о многосубъектной ситуации включает когнитивные карты отдельных субъектов с конфликтующими целями и интересами.

Рефлексия в работе Т. Таран [19], которая следует общей идее рефлексивного управления по В. Лефевру [15] и формализации информационного и рефлексивного взаимодействия сторон по Д. Новикову и А. Чхартишвили [17], представлена явно. Основопологающее допущение состоит в том, что управляющий субъект является рефлексирующим по отношению к «доверчивому» управляемому субъекту и его знаниям о ситуации, создавая возможность управления.

В работе С. Куливица [12], как и в [19], рефлексия можно проследить в постановках задач в виде более или менее явных допущений относительно веры или, напротив, неверия субъектов в адекватность чужих и своих представлений о ситуации. Такого рода оценки адекватности, принимаемые в предлагаемых методах явно или по умолчанию, по сути, являются рефлексивными. Более подробно этот аспект рассматривается в [1].

Подчеркнём, что человеческие процессы рефлексии, включая построение формализованной модели знаний о многосубъектной ситуации, а также проверку справедливости допущений

¹ Более подробные комментарии по проблеме взаимопонимания причастных сторон в когнитивном моделировании или близких контекстах имеются в [1].

относительно причастных сторон, остаются за рамками подхода 2, как и в основном массиве работ подхода 1.

Разрабатываемый авторами статьи *подход к анализу обоснованности управленческих решений на основе рефлексивных когнитивных карт* (подход 3) предлагает новое направление в привлечении возможностей рефлексии в когнитивное моделирование для многосубъектных ситуаций. (Первая публикация – [8].)

Этот подход относится практически к тем же ситуациям, что и подход 1. Однако он направлен на решение специальной прикладной задачи: анализа обоснования управленческих решений по выходу из проблемной ситуации, предлагаемых отдельными причастными сторонами при декларируемых общих целях сторон, с целью выявления узких мест в таких обоснованиях. (Иногда для краткости называем такие решения субъективными.)

При этом объектом анализа становится не только и не столько объективная ситуация, которую воспринимают субъекты (причастные стороны), сколько их взгляды на ситуацию и оценка адекватности их взглядов, сходства и различия, включая аспект информированности как частный случай. Тем самым анализ, по сути, оказывается рефлексивным.

Основа подхода 3 состоит в том, что видение проблемной ситуации разными субъектами и предлагаемые ими решения по выходу из ситуации представляются в виде когнитивной карты особого вида, более или менее явно содержащей субъективные обоснования таких решений, с последующим использованием карты как *модельного представления этих обоснований* при их сравнительном анализе и оценке.

В соответствии с имеющимся практическим заделом предполагается, что такая карта при ее целенаправленном чтении в ходе анализа служит средством столкновения различных взглядов, решений и их обоснований, которое стимулирует спонтанное рефлексивное распознавание узких мест и несоответствий

за счет известного психологического механизма когнитивного диссонанса¹.

Карты такого рода, предназначенные для стимулирования рефлексии, мы назвали рефлексивными. Методическая новизна предлагаемого подхода определяется использованием рефлексивных карт для поддержки экспертного анализа обоснованности субъективных управленческих решений.

Неотъемлемым компонентом подхода 3 является также верификация модельного представления обоснований ввиду известного спектра факторов риска для достоверности формализованных представлений в виде когнитивных карт. (См., например, [3, 4, 23].)

Анализ обоснования управленческих решений по выходу из проблемной ситуации, предлагаемых разными субъектами, рассматривается в данном подходе как экспертный процесс, использующий, с одной стороны, знания по методологии и средствам инструментальной поддержки когнитивного моделирования, а с другой, – ресурс естественной рефлексии, запускаемой механизмом когнитивного диссонанса.

В рамках развития подхода 3 сложилась методика рефлексивного анализа обоснования управленческих решений по выходу из проблемной ситуации, предлагаемых разными причастными сторонами. Методика формировалась на ряде практически значимых проблемных ситуаций, в анализе которых в разные годы участвовали авторы и их коллеги. Проводился анализ обоснования решений, предлагаемых или уже реализованных отдельными субъектами, управленческими инстанциями высокого уровня, управленческим персоналом компаний. В качестве проблемных ситуаций рассматривались транспортный коллапс

¹ Согласно Л. Фестингеру, который ввел это понятие [25], когнитивный диссонанс – это состояние психического дискомфорта индивида, вызванное столкновением в его сознании конфликтующих представлений: идей, верований, ценностей или эмоциональных реакций. (Формулировка заимствована из Википедии.). Авторская модель действия механизма когнитивного диссонанса, который порождает рефлексию и осознание несоответствий, вкупе с путями повышения его эффективности, применительно к экспертной верификации представлена, например, в [3, 20].)

в Казани (2011 г.), ситуация освобождения заложников после теракта в Дубровке (2011 г.), наркоситуация в мегаполисах РФ (2012 г.), обоснование управленческих решений по повышению качества услуг в сфере ЖКХ (2014-2016 гг.) и др.

Статья включает общую характеристику и описание методики рефлексивного анализа обоснования управленческих решений, представленной в виде базовой методики и ее модификаций; краткое описание научно-методического, языкового и инструментального обеспечения методики; демонстрацию ее работоспособности на двух прикладных примерах. На основе подхода к систематизации видов рефлексии из [2] и результатов анализа примеров применения методики вводится уточнение предлагаемой концепции рефлексивного подхода, рассчитанное на дальнейшее развитие методики. В заключении выделены некоторые практически значимые направления дальнейших исследований.

2. Общая характеристика методики рефлексивного анализа обоснования управленческих решений

2.1. ДОПУЩЕНИЯ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ МЕТОДИКИ

При разработке методики, ориентированной на решение конкретных прикладных задач управления, за основу были приняты следующие допущения.

(1) *Допущение о представимости обоснования решений в виде когнитивной карты.*

Наша гипотеза заключается в том, что адекватность управленческих решений, предлагаемых некоторым субъектом в проблемной ситуации для обеспечения декларируемых или подразумеваемых целей, соответствие этих решений объективной ситуации и, возможно, интересам других причастных сторон проявляется в его аргументации решений. Предполагается, что причинно-следственные связи, лежащие в основе аргументации у некоторого субъекта, предлагающего такого рода решения, могут быть извлечены из высказываний, публикаций и т.п. и представлены в виде его *когнитивной карты обоснования предлагаемых решений*, по крайней мере, знаковой.

В частности, в рамках схемы структуризации значимых факторов проблемной ситуации, $(D, T, E)_f$, принятой в базовой методике (раздел 3.1), обоснование решений, предлагаемых субъектом f , может быть представлено в виде *ациклической знаковой когнитивной карты*, а именно – карты обоснования требуемого влияния множества управленческих решений $(E)_f$, предлагаемых субъектом f , на множество целевых факторов $(T)_f$ в условиях действия множества $(D)_f$ дестабилизирующих факторов влияния на ситуацию.

К дестабилизирующим факторам проблемной ситуации, в понимании некоторого субъекта, относятся факторы, которые являются значимыми для ситуации, и при этом их наблюдаемое значение и/или динамика противодействует желательному поведению целевых факторов.

Запись $(\dots)_f$ в рамках базовой методике означает «...в понимании субъекта f » (или «...с точки зрения субъекта f »); в скобках – соответствующие множества.

Уточним, что представление о проблемной ситуации и воздействиях на неё по схеме структуризации значимых факторов $(D, T, E)_f$ является желательным по соображениям трудоёмкости, но не обязательным. Если имеется полная карта ситуации, которая неявно включает в себя обоснования принимаемых решений, она также может быть использована для анализа.

Сегодня методика ориентирована на знаковые когнитивные карты (в которых задаются только знаки влияний), и это обусловлено обычным дефицитом знаний приемлемой достоверности, необходимых для оценки весов причинно-следственных влияний в карте. Тем не менее отметим, что при наличии таких оценок, даже самых грубых, или при рассмотрении вариантов гипотетических оценок, удастся получать более детальные оценки обоснованности предлагаемых решений, чем в случае знаковых карт.

(2) *Допущение о сходстве и различии представлений о ситуации.*

Нередко различное видение ситуации причастными сторонами связывают с объективным различием их интересов и целей. Тем не менее мы предполагаем различие в первичном ви-

дении проблемной ситуации и, соответственно, путей выхода из нее у разных субъектов, связанных общей (по крайней мере, с первого взгляда) целью выхода из ситуации.

Как показывает наш анализ публичных обоснований предлагаемых решений по выходу из таких общих проблемных ситуаций, распространены 1) подмена конечных целей и целевых факторов ситуации, на промежуточные, с точки зрения интересов сообщества, факторы; 2) различие интересов субъектов при декларируемых «общих» целях.

Различия первичных представлений о ситуации отражаются в различии индивидуальных карт обоснования предлагаемых решений. Эта особенность существенным образом используется в методике.

Для повышения достоверности в ходе оценки обоснованности предлагаемых субъективных решений при декларируемой общности целей сообщества F представляется целесообразным ориентироваться на *общее множество конечных целевых факторов* $(T)_F$, определенных по статусным источникам, предпочтительно независимым.

Более конкретно состав факторов, влияющих на представления разных субъектов, связанных «общей» целью, или допустимые границы схождения и различий не регламентируются в силу довольно очевидной вариабельности задач, связанных с обоснованиями управленческих решений по достижению целей.

(3) *Допущения согласованности языка причастных сторон.*

Первоначально при разработке базовой методики по умолчанию предполагалась *аддитивность системы ключевых понятий*, посредством которых члены сообщества с разным видением проблемной ситуации проводят обоснование предлагаемых решений. Более широко предполагалось, что они общаются, условно говоря, на одном языке, которым владеют и составители карт, формирующие множество факторов карты, исходя из аддитивности. Иначе говоря, предполагалось естественное взаимопонимание на уровне языка.

Однако обращение к типовым практическим задачам показывает, что эти допущения могут быть завышенными из-за фактической гетерогенности сообщества с различиями субъектов,

предлагающих решения, по информированности, компетентности и др., когда по-разному понимаются одни и те же слова. Кроме того, при составлении когнитивных карт ввиду их специфики типична необходимость редактирования исходных понятий представителей сообщества по формулировке, по уровню общности.

Более практичным оказывается допущение о ключевых понятиях сообщества, закладываемых в рефлексивную карту, в основе которого лежит найденная ранее идея [18, гл. 5] *вполне согласованного понятия*. Согласно определению из [18, гл. 5], понятие является вполне согласованным (вполне коллективным) в определенном сообществе с установленными или сложившимся целями и контекстом деятельности и установленным или сложившимся распределением ролей, если каждый член сообщества может использовать в коммуникациях по видимости «одно и то же» понятие (при смысловых различиях отдельных пониманий) и при этом достигается взаимопонимание.

При этом редактирование формулировок исходных понятий при составлении рефлексивной карты считается вполне допустимым, и согласование после редактирования может считаться приемлемым. Однако ответственность за приемлемую согласованность принятого множества факторов со свойством аддитивности должны брать на себя составители карты.

Отметим, что именно такая ситуация принятия решений о допустимости редактирования исходных понятий имела место в работе над задачей, представленной в примере 1 ниже.

2.2. ОСНОВНЫЕ ИДЕИ МЕТОДИКИ

■ В случае многосубъектной ситуации с примерно общими целями сообщества, а также приемлемой согласованности языка, которым пользуются причастные стороны (см. раздел 2.1), различные видения ситуации субъектами могут быть сведены в объединенной когнитивной карте определенного вида, в которой остаются видимыми индивидуальные карты отдельных субъектов. Такая карта при ее прочтении аналитиками или верификаторами может стимулировать рефлексию, по крайней мере перекрестную. Карты именно такого типа мы назвали *ре-*

флексивными. (В дальнейшем появились другие виды рефлексивных карт и уточнилось само понятие рефлексивной карты, см. раздел 5.)

Такое представление обоснований, предлагаемых отдельными субъектами, дает возможность для более наглядного анализа обоснования как суммарного комплекса решений по выходу из проблемной ситуации, предлагаемых всеми субъектами, так и анализа и сопоставления отдельных комплексов решений, предлагаемых разными субъектами. Благодаря такому сопоставлению можно повысить достоверность оценки обоснованности комплекса мер по выходу из проблемной ситуации.

▪ Отличительная особенность объединенной когнитивной карты обоснований управленческих решений по выходу из проблемной ситуации, в которой различимы карты обоснования решений отдельных субъектов, состоит в том, что не требуется полная карта (модель) проблемной ситуации: достаточно карты, ограниченной рамками допущения о представимости (см. раздел 2.1). Напомним, что построение общей модели проблемной ситуации, может быть весьма сложной интеллектуальной задачей для составителя и привлекаемых экспертов, особенно – с учетом необходимости согласования разных точек зрения и дефицита фактических данных для характеристики текущей ситуации и ее динамики.

▪ В традиционном когнитивном моделировании по умолчанию предполагается, что для построения карты проблемной ситуации, и тем более только знаковой, достаточно знать, что это такое, и владеть знаниями в проблемной области. В противоположность традиционному подходу, методика рефлексивного анализа обоснования управленческих решений предлагает верификацию карты, по которой проводится анализ, причем предпочтительно – в процессе ее построения.

Целесообразность такого решения мотивирована тем, что, с одной стороны, предполагается высокий уровень требований к достоверности результатов применения методики, а с другой, – тем, что известны типовые ошибки в картах, часто не замечаемые даже опытными составителями. К ним относятся, в частности, ошибки несоразмерной общности понятий факторов, веду-

щие к ложной транзитивности причинно-следственных влияний в карте [4], влияния типа «производная → переменная» (например, «рождаемость → численность населения» [22]).

Еще один аспект верификации связан с использованием относительно больших карт многосубъектных ситуаций. Идея верификации таких карт посредством экспертизы карты экспертами предметной области и представителями разных заинтересованных сторон довольно естественна. Однако в рамках развития рефлексивного подхода к анализу обоснования управленческих решений предложен оригинальный путь реализации этой идеи. Задачу такой верификации можно трактовать как оценку того, что декларируемое соответствие решений одних причастных сторон интересам других обосновано.

Тем самым, возможно решать обе эти задачи, применяя одно и то же научно-методическое, языковое и даже инструментальное обеспечение (в рамках простых структур карт: ациклических или слабо циклических).

- В отличие от типичной ориентации исследователей исключительно на разработку формальных методов, для оценки обоснованности управленческих решений предполагается возможность использования интерактивных графоаналитических методов, в основе которых лежит математический аппарат анализа внешнего поведения ациклических карт (см. раздел 3.3.). Владение этим аппаратом предполагается.

- Целесообразность ориентации на экспертные методы анализа обоснованности управленческих при их инструментальной поддержке, когда это возможно, в значительной мере обусловлена разнообразием прикладных задач управления в многосубъектных ситуациях, в которых может быть полезным ресурс экспертной рефлексии. (См. раздел 3.2.)

При этом имеется возможность создать и проверить на практике базовую методiku, а затем использовать ее в качестве прототипа, адаптируемого к изменению условий применения даже для отдельных прикладных задач.

3. Описание развиваемой методики рефлексивного анализа обоснования управленческих решений

Методика анализа обоснования управленческих решений по выходу из проблемной ситуации, предлагаемых разными субъектами, определяется ее основной идеей: сопоставлением разных точек зрения на ситуацию и пути выхода из нее, а также применением верификации.

Методика в целом считается неформальной в силу существенного участия человека при решении задач, выходящего за рамки возможностей формальных методов; однако в ходе ее применения могут использоваться формальные методы и математический аппарат анализа внешнего поведения ациклических карт [5, 6, 9].

Ее частный случай, базовая методика, относится к проблемным ситуациям, в которых проблемность обусловлена наличием *дестабилизирующих факторов*; причастность разных субъектов к ситуации выражается в том, что они предлагают свои решения по выходу ситуации и при этом имеют общие цели, по крайней мере, с первого взгляда; управленческие решения, предлагаемые отдельными субъектами, выражаются в виде одной или более *мер воздействия* на отдельные факторы текущей ситуации.

Предполагается, что общее решение по комплексу мер выхода из проблемной ситуации формируется, исходя из предложений причастных сторон с предварительным анализом этих предложений и оценкой их обоснованности посредством методики; однако формирование общего решения методикой не охватывается. Более того, наличие единственного, объективно наилучшего решения, не предполагается, что нередко случается на практике в многосубъектных ситуациях.

Далее представлено описание базовой методики и выделен ряд характерных признаков отклонения от начальных условий ее применения, которые являются основанием для модификаций базовой методики.

3.1. БАЗОВАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА ОБОСНОВАНИЯ КОМПЛЕКСА МЕР

Базовая методика обоснования комплекса мер по выходу из многосубъектной проблемной ситуации в условиях действия дестабилизирующих факторов применима при справедливости допущения о приемлемой, после возможного редактирования, согласованности множества ключевых понятий (при ответственности составителей карты). Предполагается также, что вполне согласованными являются общие понятия, посредством которых производится структуризация значимых факторов проблемной ситуации S (в ее видении причастными сторонами).

Схема структуризации может быть представлена в виде тройки (D, T, E) , где каждый их символов обозначает тип множества факторов, представленный именем общего понятия, в том числе D – множество дестабилизирующих факторов, T – множество целевых факторов, E – множество мер по выходу из проблемной ситуации. В результате структуризации представлений субъекта f , $f \in F = \{f_1, f_2, \dots\}$, где F – множество причастных сторон, согласно этой схеме идентифицируются конкретные множества факторов названных типов, обозначаемые как $(\dots)_f$.

Помимо множеств $(T)_f$ целевых факторов, определяемых отдельными субъектами, выделяется общее множество $(T)_F$ конечных целевых факторов, При этом множество $(T)_F$ считается согласованным для сообщества, которое представляют субъекты из F , несмотря на различия в индивидуальных $(T)_f$.

Базовая методика состоит из двух основных этапов.

Этап 1. Построение знаковой когнитивной карты обоснования комплекса мер по выходу из проблемной ситуации, предлагаемых разными субъектами со свойством различимости карт отдельных субъектов.

Этап 2. Оценка обоснованности мер по выходу из проблемной ситуации посредством формального анализа карты-результата этапа 1.

Для простоты изложения методики принимается, что аналитик, решающий задачу анализа обоснования комплекса мер по выходу из проблемной ситуации, является составителем объ-

единенной карты обоснования комплекса мер и ее верификатором, и проводит анализ этой карты. (В общем случае возможно ролевое разделение между специалистами, привлекаемыми к решению задачи, и некоторые модификации методики.)

▪ Этап 1 включает подэтапы 1.1, построение знаковых когнитивных карт обоснования мер по выходу из проблемной ситуации, предлагаемых отдельными субъектами, и 1.2, их объединение.

1.1. Построение знаковой когнитивной карты $(K)_f$ обоснования мер, предлагаемых некоторым субъектом f , выполняется в соответствии со схемой структуризации (D, T, E) путем построения ациклического графа влияний дестабилизирующих факторов $(D)_f$ и мер $(E)_f$ на целевые факторы $(T)_f$ на языке знаковых когнитивных карт \mathcal{L}_0 , с дополнительным выделением типов факторов согласно схеме. Процесс включает

– составление цепочек причинно-следственных влияний факторов из $(D)_f$ на факторы из $(T)_f$ с представлением дестабилизирующих факторов как условно независимых (иначе, входных) и, при необходимости, с добавлением промежуточных факторов;

– привязывание мер $(E)_f$ к факторам, на которые они влияют, посредством дополнительных влияний с указанием знака влияния; при этом мера представляется изменением значения соответствующего фактора.

Если мера выражена на естественном языке субъекта не в форме изменения значения какой-то переменной, то для этой меры вводится условно независимый фактор с влиянием на какой-либо уже имеющийся фактор карты $(K)_f$. Например, мера *операции ФСКН в сотрудничестве с другими странами...* может быть представлена как увеличение значения фактора *успешность операций ФСКН в сотрудничестве с другими странами....*

1.2. После того как карты отдельных субъектов построены они объединяются в карту $(K)_F$ обоснования комплекса мер, предлагаемых разными субъектами, по следующим правилам,

подразумевающими аддитивность системы понятий факторов у разных субъектов.

- Множества дестабилизирующих факторов $(D)_f$ объединяются во множество $(D)_F = (D)_{f1} \cup (D)_{f2} \cup \dots$.

- Множества мер $(E)_f$ объединяются во множество $(E)_F = (E)_{f1} \cup (E)_{f2} \cup \dots$.

- Множество целевых факторов, выделяемых отдельными субъектами, дополняется до множества конечных целевых факторов $(T)_F$. Если какие-то целевые факторы из $(T)_f$ являются промежуточными относительно $(T)_F$, то добавляются влияния факторов $(T)_f$ на факторы $(T)_F$.

- Все промежуточные факторы в картах разных субъектов переносятся в карту $(K)_F$.

- Причинно-следственное влияние между парой факторов переносится в карту $(K)_F$, если это влияние учитывается в видении ситуации хотя бы одного субъекта.

- Каждому фактору (мере) в карте $(K)_F$ приписывается множество субъектов в виде идентификаторов этих субъектов (например, фамилий), учитывающих в своем видении ситуации этот фактор (меру).

Для построения карты $(K)_F$ предложен простой визуальный язык \mathcal{L}_1 (см. разд.3.1), позволяющий идентифицировать носителей различного видения ситуации S в элементах карты.

Получаемая карта $(K)_F$ оказывается рефлексивной. Это значит, что

- 1) в карту $(K)_F$ включаются факторы и их причинно-следственные влияния, относящиеся к видению ситуации S разными субъектами (в понимании аналитика) и, возможно, к собственному видению аналитика;

- 2) все носители различного видения ситуации S идентифицируются в элементах карты.

- На этапе 2 в зависимости от решаемой прикладной задачи оценка обособанности в ее составе может проводиться как для комплекса всех мер $(E)_F$, так и для некоторого подмножества мер $(E')_F \subset (E)_F$, например, предлагаемых отдельным субъектом.

Оценка обоснованности мер по выходу из проблемной ситуации предполагает этапы 2.1, анализ влияния мер на динамику конечных целевых факторов $(T)_F$ в карте $(K)_F$, и 2.2, оценку результативности мер.

2.1. Для анализа влияния некоторой выбранной меры $x^E \in (E)_F$ на динамику конечных целевых факторов $(T)_F$ применяется структурный анализ карты $(K)_F$, в частности, анализ косвенных влияний меры x^E на факторы из $(T)_F$ путем визуального просмотра (чтения) графа достижимости подмножества $(T)_F$ из x^E , с оценкой знаков косвенных влияний по ходу просмотра.

В результате определяются знаки косвенных влияний меры x^E на факторы из подмножества $(T)_F$. Однако в случае влияния меры x^E на некоторый целевой фактор из $(T)_F$ по путям с разными знаками возникает неопределенность, которая оценивается как дефект предлагаемых решений.

2.2. Для оценки результативности мер проводится

1) анализ динамики конечных целевых факторов $(T)_F$ при реализации мер и соответствующей смене динамики факторов, представляющих эти меры, при условии сохранения текущей динамики остальных условно независимых факторов (в частности, дестабилизирующих);

2) сопоставление динамики факторов $(T)_F$ при реализации мер с динамикой факторов $(T)_F$ без реализации мер.

Окончательная оценка обоснованности мер по результатам проведенного анализа может быть получена на основе суждений экспертов и/или с использованием критериев обоснованности.

Примером критерия обоснованности мер по отношению к некоторому целевому фактору может считаться остановка негативной тенденции изменения значения целевого фактора в результате реализации комплекса мер.

3.2. МОДИФИКАЦИИ БАЗОВОЙ МЕТОДИКИ

Разнообразие постановок практических задач, в которых целесообразно проводить анализ обоснованности управленческих решений, далеко выходит за рамки базовой методики с ее схемой структуризации знаний о проблемной ситуации. Это видно даже из упомянутых во введении примеров задач, рас-

смаатривавшихся в ходе формирования и отработки методики. Можно предположить, что общий случай едва ли предсказуем.

Назовем характерные признаки отклонения от начальных условий применения базовой методики:

- несоответствие проблемной ситуации и имеющихся начальных данных схеме структуризации значимых факторов проблемной ситуации, $(D, T, E)_f$, (в ее видении причастными сторонами):

- ситуация не связана с факторами, которые уместно рассматривать как дестабилизирующие;

- не идет речи о мерах противодействия (иной смысл управленческих решений, представимых в терминах когнитивных карт);

- специфика причастности всех или некоторых причастных сторон к ситуации (роли) не предполагает общих целей (например, объективно конфликтные интересы), хотя и требуются общие решения;

- известны определенные факторы, порождающие различие видения ситуации причастными сторонами, и они должны идентифицироваться посредством рефлексивного анализа;

- причастные стороны не равноправны: есть «главный» субъект, например, его решения являются определяющими;

- уже построена когнитивная карта проблемной ситуации глазами главного субъекта, уже содержащая ряд управленческих решений в виде причинно-следственных влияний карты; при этом нет необходимости извлекать только обоснования решений; достаточно рассматривать влияние тех или иных изменений на целевые факторы главного субъекта;

- имеется взвешенная карта.

Модификации базовой методики возникают при адаптации к отклонениям от условий ее применения. При этом во всех случаях имеется в виду

- 1) использование того или иного вида когнитивных карт, в которых как-то представлены причинно-следственные влияния, включаемые в обоснование принимаемых решений, и причастные субъекты;

2) наличие каких-то средств для когнитивной поддержки рефлексии у аналитиков и верификаторов, обусловленной много-субъектностью, с сопутствующим различием видения ситуации и/или обоснования предлагаемых решений;

3) возможность применения известных формальных и полужформальных методов, предпочтительно визуальных, для анализа обоснования решений.

Далее приемы адаптации будут показаны на прикладном примере, связанном с ЖКХ (разд.4.2).

3.3. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ, ЯЗЫКОВОЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДИКИ

Научно-методическое обеспечение. Методика рефлексивного анализа обоснования управленческих решений основана на методологии когнитивного моделирования, дополненной интерактивными графоаналитическими методами, в основе которых лежит математический аппарат анализа внешнего поведения ациклических когнитивных карт, и верификацией.

В числе графоаналитических методов – методы структурного анализа ациклических карт, методы упрощающих структурных преобразований [5, 6, 9], и новый метод анализа множества косвенных влияний.

Для верификации когнитивных карт предлагается известный подход, предусматривающий экспертную¹ верификацию: 1) по известным критериям отсутствия рисков для достоверности, 2) без предопределенных критериев [3, 23], с последующей корректировкой карты, если требуется (верификационная отладка). Кроме того, в случае анализа решений одного субъекта с использованием его карты (как в примере раздел 4.2) предлагается верификация карты представителями разных заинтересованных сторон (раздел 4.2) с применением формального аппарата и методики оценки обоснованности, обозначенного выше. (См. раздел 2.2.)

¹ *Подразумевается, что специалист, проводящий такую верификацию, должен быть «экспертом» по предлагаемому подходу к верификации.*

Языковое обеспечение. Для представления знаковых когнитивных карт обоснования решений в базовой методике предложены: язык \mathcal{L}_0 — для представления обоснования решений, предлагаемых отдельными субъектами в схеме структуризации факторов этой методики, и язык \mathcal{L}_1 — для объединенных рефлексивных карт (см. пример в разделе 4.1). Основная особенность \mathcal{L}_0 — это дополнение обычного языка знаковых карт мерами, которые предлагаются субъектом. Мера либо выражается явно специальной конструкцией «мера» с именованием меры на естественном языке, либо — неявно, скачкообразным изменением значения соответствующего фактора. (Направление изменения предполагается понятным по умолчанию.) В языке \mathcal{L}_1 добавлена конструкция фактора с идентификацией всех субъектов, которые его «видят» в своих обоснованиях.

Предполагается, что при модификации базовой методики в случаях отклонений постановок задач от условий ее применения могут потребоваться и модификации языков.

В частности, в модификации методики, рассмотренной в примере 2 (раздел 4.2), предложен язык \mathcal{L}_2 , который отличается от обычного языка знаковых когнитивных карт тем, что, как и в \mathcal{L}_1 , добавлена конструкция фактора с идентификацией субъектов, но предполагается, что такая идентификация соответствует объективному различию интересов сторон в моделируемой ситуации.

Инструментальное обеспечение. Методика рефлексивного анализа обоснования управленческих решений поддерживается авторской технологией ПАВК-51 [7] на основе свободно распространяемого средства ИМС СтарTools и собственного прототипа MapConstructor, в которой реализован комплекс технологических приемов для поддержки визуализации, верификации и формального анализа карт.

Этот комплекс включает средства, существенно облегчающие визуальное понимание и идентификацию значимых свойств когнитивных карт за счет повышения наглядности и снижения когнитивной нагрузки при работе с картой. В их числе средства визуальной реструктуризации карты («распутывания» без изме-

нения структуры причинно-следственных влияний в карте), средства обратимой структурной свертки, позволяющие абстрагироваться от таких деталей как промежуточные блоки в карте, несущественные для анализа управленческих решений причастных сторон и др.

4. Демонстрация работоспособности методики на прикладных примерах

Представлены два практически значимых примера, первый из которых основан на базовой методике с ее схемой структуризации знаний о проблемной ситуации, а второй – по ряду признаков не соответствует начальным условиям ее применения. Однако при этом основная идея и поддерживающий математический аппарат сохраняются при некоторой адаптации базовой методики.

4.1. АНАЛИЗ ОБОСНОВАНИЯ МЕР ПО ВЫХОДУ ИЗ НАРКОСИТУАЦИИ В МЕГАПОЛИСАХ РФ

Некоторые результаты применения базовой методики демонстрируются на примере анализа обоснования мер по выходу из наркоситуации в мегаполисах РФ. В качестве причастных сторон, которые могут предлагать решения на государственном уровне, выступают А.С. Багдасаров (член комитета Госдумы по международным делам) и В.П. Иванов (директор Федеральной службы РФ по контролю за оборотом наркотиков); на уровне крупного города – Е.В. Ройзман (один из учредителей фонда «Город без наркотиков» в г. Екатеринбург)¹.

Этап 1 и его результаты. В соответствии с базовой методикой (см. раздел 3.1) на этапе 1.1 строятся карты обоснования мер отдельных субъектов. Для краткости рассмотрим карту обоснования мер только одного субъекта А.С. Багдасарова, (К)_Б, представленную на рис. 1.

¹ *Выражаем благодарность нашим коллегам Т.А. Телицыной и А.А. Федотову, которые выполнили основную работу по извлечению информации из публикаций и построению карт и участвовали в анализе.*

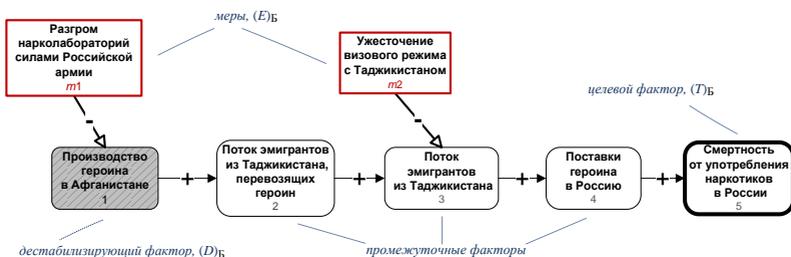


Рис. 1. Знаковая когнитивная карта обоснования мер по выходу из наркоситуации в РФ, предлагаемых А.С. Багдасаровым

В карте $(K)_Б$ по схеме структуризации значимых факторов $(D, T, E)_f$ выделены следующие множества: $(T)_Б = \{5\}$, $(D)_Б = \{1\}$, $(E)_Б = \{m1, m2\}$.

В силу специфики задачи рассматриваются влияния предлагаемых общегосударственных мер на отдельные мегаполисы РФ, поэтому далее фактор 4 (поставки героина в Россию) и фактор 5 (смертность от употребления героина в России) сужаются до поставки героина в мегаполис и смертности от употребления героина в мегаполисе соответственно.

На этапе 1.2 карты отдельных субъектов объединяются в знаковую когнитивную карту $(K)_F$ обоснования комплекса мер по выходу из наркоситуации в мегаполисах РФ, предлагаемых причастными сторонами, $F = \{Б \text{ (Багдасаров)}, И \text{ (Иванов)}, Р \text{ (Ройзман)}\}$, в которой причастные стороны идентифицируются фамилией в соответствующих элементах карты (рис. 2).

В карте $(K)_F$ по схеме $(D, T, E)_f$ выделены следующие множества:

- множество конечных целевых факторов $(T)_F = \{5, 6, 12, 13\}$;

- множество дестабилизирующих факторов в видении Багдасарова $(D)_Б = \{1\}$;

- множество дестабилизирующих факторов в видении Иванова $(D)_И = \{1, 7, 14, 15\}$;

- множество дестабилизирующих факторов в видении Ройзмана $(D)_Р = \{14, 15\}$;

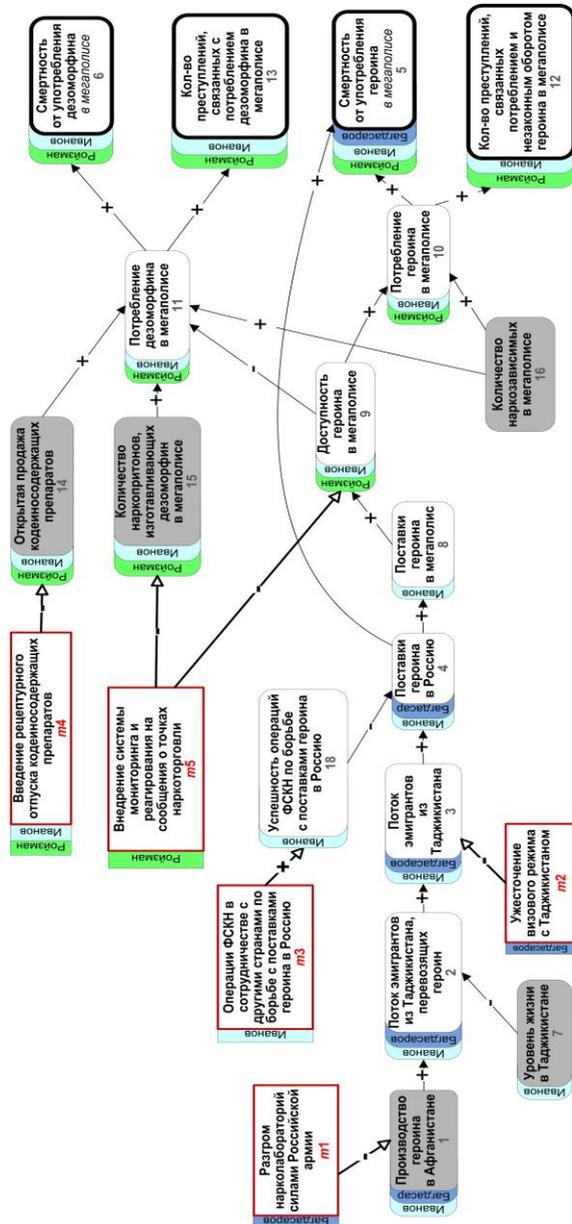


Рис. 2. Объединенная знаковая когнитивная карта $(K)_F$

- множество мер, предлагаемых Багдасаровым, $(E)_B = \{m1, m2\}$;
- множество мер, предлагаемых Ивановым, $(E)_И = \{m3, m4\}$;
- множество мер, предлагаемых Ройzmanом, $(E)_P = \{m4, m5\}$.

Дестабилизирующий фактор 16 (*количество наркозависимых в мегаполисе*) вместе с влияниями на фактор 10 (*потребление героина в мегаполисе*) и фактор 11 (*потребление героина в мегаполисе*) был добавлен в карту $(K)_F$ аналитиком после верификации по критерию соразмерной полноты влияний на фактор, по которому проверялись факторы 10 и 11.

Этап 2 и его результаты. В качестве общей цели предлагаемых мер по выходу из наркоситуации в мегаполисах РФ рассматривается снижение текущих значений всех негативных целевых факторов множества $(T)_F$.

2.1. Применяя графоаналитические методы с визуальным прослеживанием множества косвенных влияний предлагаемых мер на факторы из $(T)_F$ и оценивая их по простому критерию достижимости общих целей, нетрудно заметить, что меры $(E)_B$, предлагаемые Багдасаровым для улучшения ситуации, в отрыве от предложений других субъектов недостаточны по отношению к $(T)_F$, поскольку они предполагают влияние фактора 9 (*доступность героина в мегаполисе*) только на целевой фактор 5 (*смертность от употребления героина в мегаполисе*), $(T)_B \subset (T)_F$, не учитывая негативного влияния на целевой фактор 6 (*смертность от употребления дезоморфина в мегаполисе*) через фактор 11 (*потребление дезоморфина в мегаполисе*).

2.2. При оценке мер $(E)_P$, предлагаемых Ройzmanом, обнаруживается, что мера $m5$ (*внедрение системы мониторинга и реагирования на сообщения о точках наркоторговли*) имеет 2 косвенных влияния с разными знаками на фактор 11. В этом случае в знаковой карте недостаточно данных, чтобы оценить, приведет ли мера $m5$ к увеличению или уменьшению величины фактора 11, который влияет на целевые факторы 6 и 13. Однако по отношению к мерам $(E)_B$ меры $(E)_P$ учитывают влияние фактора 9 (*доступность героина в мегаполисе*) на фактор 11 (*потребление дезоморфина в мегаполисе*).

2.3. Меры (E)_и, предлагаемые Ивановым, направлены не только на противодействие дестабилизирующему фактору 1 (*производство героина в Афганистане*), но также на противодействие фактору 14 (*открытая продажа кодеиносодержащих препаратов*), тем самым для мер (E)_и выполняется критерий достижимости общих целей. Однако мера т3 (*операции ФСКН в сотрудничестве с другими странами по борьбе с поставками героина в Россию*) может оказаться недостаточной в силу влияния дестабилизирующего фактора 16 (*количество наркозависимых в мегаполисе*), добавленного после верификации карты.

Рассмотренные результаты применения методики подтверждают ее работоспособность при анализе обоснования предлагаемых мер по отношению к общей цели выхода из проблемной ситуации. В частности, при анализе рефлексивной карты обнаружено, что:

1) учет мнений других субъектов может снизить оценку результативности мер, предлагаемых некоторым субъектом (в случае с А.С. Багдасаровым);

2) возможна неопределенность оценки результативности мер, предлагаемых некоторым субъектом (в случае с Е.В. Ройзманом);

3) верификация когнитивной карты обоснования мер может снизить оценку результативности комплекса мер, предлагаемых разными субъектами.

4.2. АНАЛИЗ ОБОСНОВАНИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СОГЛАСОВАНИЮ ИНТЕРЕСОВ В ЖКХ

Проблемная ситуация, рассматриваемая в этом примере, – это деятельность управляющей организации в сфере ЖКХ (УО), которая находится в конфликте целей и интересов с несколькими заинтересованными сторонами, включая собственников помещений в многоквартирном доме (МКД), государство и некоторые организации. Задача управления, решаемая в данном примере, – это разработка и обоснование продвинутой стратегии деятельности УО [11] в соответствии с современной концепцией менеджмента качества, которая ориентирована на «удовлетворенность всех заинтересованных сторон». Предвари-

тельно были выбраны «те заинтересованные стороны, с которыми можно построить взаимовыгодные отношения на основе партнерства». Экономист С. А. Евсеева, представляющая интерес УО, обратилась к методологии когнитивного моделирования в ее варианте, усовершенствованном разработками лаборатории 51 ИПУ РАН, в частности, применительно к этой задаче. В части верификации создаваемой когнитивной карты стратегии УО мы впервые, помимо разработанного ранее подхода к экспертной верификации, требующей компетентности в области когнитивного моделирования, предложили применить экспертизу карты экспертами в сфере ЖКХ и представителями других заинтересованных сторон. Понятно, что последнее предложение обусловлено неотъемлемым наличием таких сторон в контексте требования их «удовлетворенности».

Согласно разделу 2.2, задачу такой верификации можно свести к оценке обоснованности декларированного свойства удовлетворенности для значимых заинтересованных сторон в предлагаемой стратегии УО. В примере рассмотрено решение задачи верификатором-представителем интересов собственников МКД.

Одна из основных особенностей задачи, рассматриваемой в примере, – это наличие знаковой когнитивной карты, которая именуется как «Согласование интересов заинтересованных сторон УО», но фактически представляет стратегию деятельности именно УО в условиях конфликтных интересов. При этом обоснования соответствия стратегии критерию удовлетворенности сторон явно не представлены, но необходимости извлекать карту обоснований, согласно базовой методике, нет.

Еще одна особенность, значимая для решаемой задачи, состоит в том, что вместо аналитика, равноудаленного от всех причастных сторон, который является основным пользователем когнитивной карты согласно базовой методике, здесь имеется главный субъект, УО, и его представитель – составитель карты, со своим кругом знаний и интересов, а верификатор представляет другие интересы.

Как обнаружилось в ходе решения задачи, прочтение одной и той же карты и выводы из нее у двух пользователей карты существенно отличаются.

Отличия от условий применения базовой методики, потребовали ее адаптации, прежде всего, на этапе 1, особенно в структурировании множества факторов карты.

При этом основная конструкция языка карт \mathcal{L}_1 базовой методики, а именно, - приписывание конкретному фактору A в карте множества субъектов $F = \{f_1, f_2, \dots\}$, которые имеют к нему отношение, сохранилась и в новом языке \mathcal{L}_2 (несмотря на синтаксические различия). Однако смысл такой конструкции несколько изменился с учетом предмета рефлексии субъект-составителя карты: для \mathcal{L}_2 она интерпретируется как «фактор A является **интересом** субъектов f_1, f_2, \dots », тогда как для \mathcal{L}_1 она означает «фактор A **видим** субъектами f_1, f_2, \dots » (по умолчанию, в рамках обоснования предлагаемых мер).

Этап 1 и его результаты. В множестве факторов составителем карты при посредстве предварительного анализа (предшествующего этапу 1) визуально выделены

1) целевые факторы, включая собственные целевые факторы, такие как (1) *результативность работы персонала УО (интерес УО)*; целевые факторы других заинтересованных сторон, такие как (2) *размер заработной платы персоналу УО (интерес персонала УО)*, и смешанные факторы, на которых проявляется конфликт интересов, такие как (3) *тариф на управление МКД, устанавливаемый собственниками помещений в МКД (интерес государства, собственника, УО)* или (4) *качество жилищных услуг, оказываемых подрядными (обслуживающими) организациями (интерес государства, собственника и УО)*;

2) несколько видов условно независимых факторов, отличающихся по возможностям управления со стороны главного субъекта, включая факторы, поддающиеся собственным управляющим воздействиям, такие как (5) *результативность системы менеджмента качества управляющей организации*; факторы влияния других заинтересованных сторон, такие как (6) *эффективность контроля качества услуг собственниками поме-*

щений в МКД; неуправляемые переменные, такие как (7) *уровень конкуренции на рынке услуг по управлению МКД* \ \ *привлекательность отрасли*; условно постоянные факторы, такие как (8) *климатические условия* (которые могут различаться у разных УО) и др.

Фрагмент построенной карты¹ (исходная карта включает около 50 факторов) с некоторыми «свертками» блоков, несущественных для решаемой задачи анализа, показан на рис. 3. Элементы с многоточием «...» обозначают (1) в центре фрагмента – места свертки промежуточных факторов; (2) справа – обрезание части карты, несущественной для демонстрации.

Этап 2 и его результаты. Верификации была подвергнута карта, полученная на промежуточном этапе ее разработки и коррекции.

2.1. В качестве проверочного теста верификатором, представляющим интересы собственников, выбран анализ последствий повышения *эффективности контроля качества услуг собственниками помещений в МКД* (фактор 6, обозначаемый далее как x^6) при прочих равных величинах условно независимых факторов влияния на ситуацию, включая (9) *перечень обязательных услуг по управлению МКД* и, соответственно, (10) *тариф на управление МКД, устанавливаемый собственниками*.

Уточним, что повышение *эффективности контроля* само по себе не предполагает изменений по факторам (9) и (10), но повышает возможность обнаружения несоответствия между фактическим уровнем качества услуг, предоставляемых УО, и оплачиваемым уровнем требований, а также, предположительно, повышает *обнаруживаемое отставание* фактического уровня качества услуг от УО относительно оплачиваемого уровня требований.

¹ Фрагмент публикуется с разрешения автора карты.

В состав множества $(T')_C^{YO+}$ целевых факторов, по которым оценивались последствия воздействия на фактор $x^C = (6)$, отобраны не только конфликтный, с точки зрения главного субъекта, фактор (3) *тариф на управление МКД, устанавливаемый собственниками э в МКД (интерес государства, собственника, УО)*, но и некоторые целевые факторы конфликтующих заинтересованных сторон: (11) *прибыль УО*, и (2) *размер заработной платы персоналу УО (интерес персонала УО)*.

В аспекте рефлексии это означает, что представления двух конфликтующих заинтересованных сторон о составе факторов, на которых должно проявляться согласование интересов сторон не совпадают:

$$(T)_{YO}^{YO+} = \{3\}; (T')_C^{YO+} = \{3, 8, 2\}; (T)_{YO}^{YO+} \subset (T')_C^{YO+} \subset (T)_C^{YO+}$$

Здесь T , T' означает множество целевых факторов, полное или неполное; нижний индекс в выражении $(\dots)_{YO}$ или $(\dots)_C$ обозначает субъекта, с позиций которого отбиралось множество в скобках; верхний индекс обозначает множество факторов, из которого проводился отбор, причем это множество идентифицируется субъектом или субъектами, интересы которого оно представляет. В данном примере $YO+$ – это множество, включающее УО и ее заинтересованные стороны.

Множество $(T')_C^{YO+}$ отбиралось предварительным беглым просмотром исходной карты.

2.2. Множество косвенных влияний управляющего фактора x^C на отобранное множество целевых факторов $(T')_C^{YO+}$ оценивалось визуально просмотром (чтением) графа $R(x^C, (T)_C)$ – графа достижимости подмножества $(T)_C$ конечных факторов в составе $(T')_C^{YO+}$ из фактора x^C , с оценкой знаков косвенных влияний по ходу просмотра.

Приемлемая трудоемкость (иначе, когнитивная нагрузка на аналитика) при таком просмотре обеспечивалась за счет применения комплекса технологических приемов, реализованных в

авторской технологии ПАВК-51 на основе свободно распространяемого средства ИМС StarTools, включая

- визуальное расположение карты, поддерживающее чтение карты слева-направо, сверху-вниз;
- «свертку» промежуточных факторов и блоков типа «1 вход – 1 выход»;
- визуальное выделение прямых влияний, принадлежащих графу достижимости $R(x^C, (T)_C)$;
- сокрытие знаков влияний там, где они не влияли на определение суммарных знаков косвенных влияний в $R(x^C, (T)_C)$.

В результате визуального просмотра карты подтвердилось, что действительно повышение *эффективности контроля качества услуг собственниками помещений в МКД* влечет рост *качества услуги по управлению МКД (интерес государства, собственника, УО)* и *качества жилищных услуг, оказываемых подрядными (обслуживающими) организациями (интерес государства, собственника и УО)*, что должно удовлетворить собственников МКД.

Однако вслед за этим почему-то происходит, причем двумя путями, один из которых включает промежуточный фактор, рост фактора (12), *процент оплаты жилищно-коммунальных услуг и услуги по управлению МКД собственниками помещений в МКД (интерес УО)* и факторов *прибыль от деятельности по управлению МКД и прибыль управляющей организации (интерес УО)*, а затем растет и *размер заработной платы персоналу УО (интерес персонала УО)* (фактор 2). Очевидный когнитивный диссонанс представителя собственников МКД свидетельствует о том, что стратегия УО, согласно представленному описанию в виде карты глазами УО, $(K)_{УО}$, не только не обладает декларированным свойством удовлетворенности сторон, с точки зрения собственников, но и характеризуется противоречащими свойствами.

2.3. Диагностика причин несоответствия стратегии УО критерию удовлетворенности собственников МКД, с позиции собственников, позволяет допустить две причины: (1) действительное несоответствие как свойство стратегии УО и

(2) неадекватное описание процесса реагирования УО на воздействие со стороны собственников, которое прочитывается в карте.

Именно здесь обнаруживается разночтение одной и той же карты у двух пользователей карты, упомянутое выше.

Более глубокое объяснение этого факта выходит за рамки данной статьи. Однако, согласно [2], типичной для человека является неосознаваемая установка на нереплексивную, некритическую позицию в восприятии собственных представлений. Наша гипотеза состоит в том, что именно она могла стать основной причиной неадекватного описания, в противовес установке на критический анализ у верификатора.

Появление новой информации, негативной оценки верификатора, согласно нашей междисциплинарной модели экспертной верификации [20, 21], может вызвать у составителя карты когнитивный диссонанс с некритической начальной установкой. И этот диссонанс может вызвать рефлексии: осознание сомнительности, недостаточной обоснованности стратегии и/или ее описания, относительности представлений о том, как собственники понимают удовлетворяющее их согласование интересов сторон, с последующей коррекцией.

5. Уточнение понятия рефлексивной когнитивной карты. Развитие концепции рефлексивного подхода

Не останавливаясь на обсуждении понятия рефлексии и версий его толкования, предварительно уточним, что в общем понятии рефлексии, независимо от различия в толкованиях, необходимым элементом является, по крайней мере, один субъект – тот, в сознании которого происходит когнитивный процесс рефлексии. Согласно систематизации видов рефлексии из [2], которая следует основным концепциям В. Лефевра, один из основных видов рефлексии при работе субъекта со знаниями состоит в так называемом разведении знаний как таковых и «объекта», к которому относятся эти знания, в сознании субъекта («на планшете сознания», «в поле сознания»). И такое разве-

дение часто сопровождается осознанием относительности своих знаний.

Рефлексия нередко срабатывает через известный механизм когнитивного диссонанса, вызывающего такое разведение. В случае нерефлексивной позиции субъекта-носителя знаний, которая является наиболее типичной, разведения не происходит, субъект думает об объекте, не осознавая, что в действительности он думает о своих знаниях об этом объекте.

В когнитивном моделировании объект, отражаемый в форме модели в сознании субъекта, обычно называют ситуацией. При этом в случае многосубъектной ситуации, в сознании субъекта в нее включены не только факторы и причинно-следственные влияния между ними, но и субъекты – причастные стороны. В зависимости от наличия рефлексии и ее форм субъект-носитель знаний о ситуации может либо думать об этих субъектах как таковых, либо разводить их и их знания.

Наша первоначальная идея, связанная с использованием когнитивных карт для анализа обоснований управленческих решений в многосубъектных ситуациях, состояла в том, чтобы «столкнуть» в едином описании-знании несовершенные представления различных субъектов, предлагающих управленческие решения в общей ситуации. Предполагалось, что такое столкновение должно способствовать возникновению диссонанса и рефлексии на тему несовершенства отдельных решений. При этом подразумевалось, что требуется подходящий язык когнитивных карт, которые были названы рефлексивными. Идея была воплощена в базовой методике анализа и продемонстрировала свою успешность.

Однако позднее мы столкнулись со случаями разночтения карт разными субъектами, как в примере 2 выше (в том числе случаев, не связанных с анализом обоснований). Получалось, что по признакам наличия рефлексии одна и та же карта оказывается рефлексивной для одних субъектов и нерефлексивной (или «менее рефлексивной») – для других.

Для уточнения сложившейся ситуации приведем экспертные оценки для характерных случаев.

- Любая карта на обычном языке знаковых когнитивных карт \mathcal{L}_0 считается нерелексивной, поскольку в языке нет выразительных средств (конструкций), по крайней мере, базовых, которые могут рассматриваться как средства, пригодные для явного представления перекрестной рефлексии. (Рефлексия при прочтении такой карты некоторым субъектом, например, рефлексия у подготовленного верификатора на тему относительности (чужих) субъектных знаний, представленных в карте, может возникать; но она не обусловлена выразительными средствами языка карт.)

- Карта на языке \mathcal{L}_1 базовой методики релексивна по отношению к любому субъекту, владеющему этим языком, поскольку конструкция языка вида $(X)_y$, « X в понимании y »¹, явно разводит субъекта y и его понимание элемента X – объекта, субъекта, свойства и так далее. (При этом возможности рефлексии со стороны субъекта f_0 , читающего карту, не обязательно исчерпываются такими явно релексивными конструкциями.)

- В примере 2, раздел 4.2, карта стратегии УО на визуальном языке \mathcal{L}_2 , является релексивной для верификатора, представляющего интересы собственников МКД, поскольку она вызывает релексивное разведение представлений о ситуации составителя карты, включая интересы ее субъектов, и реальное положение дел с последующим умозаключением о неадекватности этих представлений.

- Напротив, как можно понять из разд.4.2 (п.2.3), карта стратегии УО на языке \mathcal{L}_2 для ее конкретного составителя, представляющего интересы УО, – не релексивна, согласно гипотезе. Составитель, очевидно, верит в свое представление о том, как представлена «удовлетворенность» собственников, не замечая, что это – только его модель собственников. Не случайно, представитель интересов собственников отбирает более широкое множество конфликтующих факторов. Напомним, что используемая конструкция вида $(X)_y$ в языке \mathcal{L}_2 имеет несколько

¹ Говоря о виде конструкции, мы имеем в виду ее семантику, не касаясь синтаксиса.

иной смысл « X с позиции y », соответствующий объективному различию интересов сторон. Можно лишь предполагать, что употребление такой конструкции не вызывает рефлексии у составителя карты в силу фактора объективности.

С учетом анализа примеров и причин, порождающих ситуацию, предлагается следующее рабочее определение.

Когнитивная карта K на некотором языке \mathcal{L} является *рефлексивной для читающего ее субъекта* f_1 , если, в силу приданных ей свойств, она способствует тому, чтобы у субъекта f_1 возникла рефлексия: разведение в сознании f_1 каких-то субъектов, причастных ситуации S , включая, возможно, субъекта-составителя карты f_0 , и их знаний относительно того или иного элемента ситуации S , представленных в K (будь то фактор ситуации, субъект, причастный ситуации, или иной аспект).

При этом субъект f_1 , читающий карту, и субъект f_2 , охваченный рефлексией в сознании f_1 , могут как совпадать (авторрефлексия), так и быть различными (перекрестная рефлексия).

Говоря о свойствах, приданных карте, имеем в виду не только семантические конструкции ее языка \mathcal{L} , но и дополнительные свойства, достигаемые за счет тех или иных средств визуализации. Речь идет о свойствах, которые усиливают доступность для читателя аспектов карты, значимых для анализа обоснований управленческих решений, и столкновение отдельных точек зрения или аспектов. Иначе говоря, это – свойства, обеспечивающие когнитивную поддержку читателя и способствующие рефлексии. Отметим, что в примере 2 именно набор описанных приемов визуализации позволил сделать аномалии в обоснованиях неадекватности наглядно читаемыми, что хорошо видно на рис. 3.

В итоге анализа и экспертных оценок практически значимых примеров, представленных в статье, и некоторых других выдвигается концепция повышения качества (достоверности) управленческих решений в многосубъектных ситуациях посредством авторефлексии и перекрестной рефлексии субъектов над знаниями этих субъектов, представленными в виде когнитивных карт. Усиление такой рефлексии может быть достигнуто как посредством специальных языков рефлексивных когнитивных

карт, так и усилением умений и навыков рефлексии над знаниями при помощи найденных ранее когнитивных механизмов.

6. Заключение

Проведенные исследования в рамках развития рефлексивного подхода к анализу обоснования управленческих решений по выходу из проблемных ситуаций с многими причастными сторонами, включая обобщение практики такого анализа, позволяют сделать следующий вывод. Методы, которые учитывают рефлексивные аспекты взаимодействий в многосубъектных ситуациях, на сегодня недостаточны для анализа сложной структуры современных информационных взаимодействий, включая публичные мотивации принимаемых решений¹.

В соответствии с выдвинутой концепцией повышения качества (достоверности) управленческих решений в многосубъектных ситуациях посредством авторефлексии и перекрёстной рефлексии целесообразны дальнейшие исследования и разработки по языкам когнитивных карт, ориентированным на рефлексивную, а также по возможностям управления качеством когнитивного процесса рефлексии над знаниями при посредстве когнитивного диссонанса. В частности, речь идет о развитии умений и навыков рефлексии при работе с когнитивными картами, и инструментальных средствах поддержки такой работы. Для этих целей могут быть использованы

1) предложения по формализованному языку для рефлексивного описания многосубъектных ситуаций [2], в основе которого лежит модифицированный и расширенный язык рефлексивных многочленов В.А. Лефевра, и

2) наработки по междисциплинарным моделям действия когнитивного диссонанса в таких процессах работы человека над знаниями, как экспертная верификация и идентификация ситуаций [3, 20, 21].

¹ В том числе такие способы публичной мотивации, которые широко используют разные виды манипулирования и информационного противоборства.

Для типовых многосубъектных ситуаций, в которых приемлемое согласование ключевых понятий причастных сторон оказывается проблемным, представляется целесообразным проведение дальнейших исследований по выработке согласованного языка для коллективного осмысления ситуаций в ходе решения конкретной практической задачи.

Литература

1. АБРАМОВА Н.А. *О развитии рефлексивного подхода к многосубъектным ситуациям в когнитивном моделировании* // Труды 10-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2017, Москва). – Т.1. – М.: ИПУ РАН, 2017. – С. 169–180.
2. АБРАМОВА Н.А. *Рефлексивный подход к проблеме взаимопонимания* // Сборник статей «Человеческий фактор в управлении» / Под ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберга, Д.А. Новикова. – М.: КомКнига, 2006. – С. 52–82.
3. АБРАМОВА Н.А. *Экспертная верификация при использовании формальных когнитивных карт. Подходы и практика* // Управление большими системами. – 2010. – Специальный выпуск 30.1 «Сетевые модели в управлении». – С. 371–410.
4. АБРАМОВА Н.А., КОВРИГА С.В. *Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт* // Проблемы управления. – 2008. – №6. – С. 23–33.
5. АБРАМОВА Н.А., МАКАРЕНКО Д.И., ПОРЦЕВ Р.Ю. *Развитие методов визуального анализа при моделировании ситуаций на основе когнитивных карт* // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XII, Москва, 2014). – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 4084–4090.
6. АБРАМОВА Н.А., ПОРЦЕВ Р.Ю. *Аналитические методы для анализа слабоструктурированных ситуаций на основе функциональных когнитивных карт* // Труды XX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 62–70.

7. АБРАМОВА Н.А., ПОРЦЕВ Р.Ю. *Об информационной технологии построения, анализа и верификации когнитивных карт «ПАВК-51»* // Материалы международной научно-практической конференции «Теория активных систем» (ТАС-2016, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2016. – С. 377–382.
8. АБРАМОВА Н.А., ПОРЦЕВ Р.Ю. *Рефлексивный подход к анализу обоснованности мер по обеспечению безопасности системы на основе методологии когнитивного моделирования* // Труды 23-й Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (Москва, 2015). – Москва – Астрахань: РГГУ, 2015. – С. 349–353.
9. АБРАМОВА Н.А., ФЕДОТОВ А.А. *О развитии аналитического подхода к определению внешнего поведения моделей на основе динамических когнитивных карт* // Труды VIII Междунар. конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций» (CASC'2009). – М.: ИПУ РАН, 2009. – С. 23–40.
10. АВДЕЕВА З.К., КОВРИГА С.В. *О некоторых принципах и подходах к построению коллективных когнитивных карт ситуаций* // Управление большими системами. – 2014. – №. 52. – С. 37–68.
11. ЕВСЕЕВА С.А. *Исследование путей повышения эффективности ЖКХ посредством когнитивных карт* // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014). – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 4117–4125.
12. КУЛИВЕЦ С.Г. *Моделирование конфликтных ситуаций с несогласованными представлениями у агентов на основе игр на линейных когнитивных картах* // Проблемы управления. – 2010. – №4 – С. 42–48.
13. ЛЕПСКИЙ В.Е. *Рефлексивный подход и когнитивное моделирование* // Материалы 1-й Международной конференции. Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций. – М.: ИПУ РАН, 2001. – С. 140–146.
14. ЛЕФЕВР В.А. *Конфликтующие структуры*. – М.: Советское радио, 1973. – 158 с.

15. ЛЕФЕВР В.А. *Конфликтующие структуры*. – М.: Институт психологии РАН, 2001. – 136 с.
16. МАКСИМОВ В.И., РАЙКОВ А.Н. *Коллективные когнитивные карты в системах принятия решений* // Международный симпозиум «Рефлексивное управление»: тез. докладов. – М.: Институт психологии РАН, 2000. – С. 86–88.
17. НОВИКОВ Д.А., ЧХАРТИШВИЛИ А.Г. *Рефлексивные игры*. – М.: СИНТЕГ, 2003. – 160 с.
18. ПРАНГИШВИЛИ И.В., АБРАМОВА Н.А. и др. *Поиск подходов к решению проблем* // Серия «Информатизация России на пороге XXI века». – М.: СИНТЕГ, 1999.– 284 с.
19. ТАРАН Т.А., ШЕМАЕВ В.Н. *Метод моделирования рефлексивного управления на основе когнитивных карт* // Тр. IV Междунар. конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций». – М.: ИПУ РАН, 2004. – С. 132–139.
20. ABRAMOVA N. *Interdisciplinary approach to verification in decision-making with formal methods* // In: Handbook on Psychology of Decision-Making: New Research / Ed. by K.O. Moore, N.P. Gonzalez. – NY: Nova Science Pub Inc, 2012. – P. 89–111.
21. ABRAMOVA N. *The cognitive approach to the problem of identification validity in cognitive mapping* // 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control. – Troyes, France, 2016. – IFAC-PapersOnLine. – Vol. 49, Iss. 12. – P. 586–591.
22. ABRAMOVA N., KOVRIGA S. *Criterial Approach to Verification at Cognitive Mapping of Ill-Structured Situation Dynamics* // Proc. of the 30th Int. Conference of the System Dynamics Society. – St. Gallen, Switzerland, 2012. – P. 1–23. – URL: <http://www.system-dynamics.org/conferences/2012/index.html>.
23. ABRAMOVA N., KOVRIGA S. *The expert approach to verification at cognitive mapping of ill-structured situations* // Proc. of the 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, 2011. – P. 1997–2002.

24. DIAS R., CABRAL A.S., LOPEZ B., BELDERRAIN M.C.N. *The Use of Cognitive Maps for Requirements Elicitation in Product Development*. // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2016. – No. 8(2). – P. 178–192.
25. FESTINGER L.A. *Theory of Cognitive Dissonance*. – Row-Peterson, Evanston, MA, 1957. Русский перевод: Фестингер Л. *Теория когнитивного диссонанса*: Пер. с англ. СПб.: Ювента, 1999.
26. GRAY S., ZANRE E., GRAY S. *Fuzzy cognitive maps as representations of mental models and group beliefs: theoretical and technical issues* // Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering. Vol. 54 of the series Intelligent Systems Reference Library. – Springer International Publishing AG. – 2013. – P. 29–48.
27. GRAY S.A. et al. *Mental modeler: A fuzzy-logic cognitive mapping modeling tool for adaptive environmental management* // IEEE 46th Hawaii Int. Conference on System Sciences (HICSS-2013). – 2013. – P. 965–973.
28. KOSKO B. *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. – 1992.
29. ÖZESMI U., ÖZESMI S. *Ecological models based on people's knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach* // Ecological Modelling. – 2004. – Vol. 176, Iss. 1–2. – P. 43–64.
30. PÉREZ-TERUEL K., LEYVA-VÁZQUEZ M., ESTRADA-SENTÍ V. *Mental models consensus process using fuzzy cognitive maps and computing with words* // Ing. Univ. – 2015. – Vol. 19, No. 1. – P. 173–188. – DOI: <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana>
31. SCAVARDA A.J., BOUZDINE-CHAMEEVA T. et al. *A methodology for constructing collective causal maps* // Decision Sciences Journal. – 2006. – No. 37(2). – P. 263–284.

ON THE DEVELOPMENT OF REFLEXIVE APPROACH TO ANALYSIS OF CONTROL DECISIONS VALIDITY BY COGNITIVE MAPPING

Nina Abramova, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science (abramova@ipu.ru).

Svetlana Kovriga, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow (kovriga@ipu.ru).

Ruslan Portsev, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow (poruss@mail.ru).

Abstract: A reflexive approach to analysis of control decisions validity on the solutions of problematic situations with many stakeholders is developed, which generalizes the practice of such analysis. The approach is based on the cognitive maps use of special kinds, which are called reflexive due to the reflection processes stimulation and various verification methods that use reflection. The approach is implemented in the form a technique adapted to different statement of control tasks. The technique is supported by the languages of reflexive maps and graph-analytical methods and techniques of analysis, which are implemented in the author's technology of cognitive mapping. The technique efficiency is demonstrated in two applied examples, which differ by the statement of control tasks. Some directions of the further development of the approach are determined.

Keywords: cognitive mapping, multisubject situation, stakeholder, control decisions validity, reflexive approach, reflexive cognitive maps.

УДК 519.816

ББК 60.82

DOI: 10.25728/ubs.2018.76.2

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии В.Н. Бурковым.*

*Поступила в редакцию 12.12.2016.
Опубликована 30.11.2018.*

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ ЗАПАСА И ПОТОКА¹

Ратнер С. В.²,

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Разрабатывается подход к решению задач экологического анализа среды функционирования для производственных объектов, чья деятельность характеризуется множеством переменных двух разных типов – переменных запаса и переменных потока. Изучаются ограничения, дополнительно накладываемые на свойства множества производственных возможностей. Предлагается постановка задачи для оценки сравнительной эффективности региональных систем экологического менеджмента, функционирующих на определенном временном интервале. Приводится расчетный пример для оценки сравнительной эффективности систем экологического менеджмента регионов Центрального Федерального округа в период с 2010 по 2014 гг. Обсуждаются возможности использования разработанного метода на практике.

Ключевые слова: анализ среды функционирования, динамические модели, экологическая эффективность, региональная экономика, экологический менеджмент.

1. Введение

В последние годы экологический анализ среды функционирования (в англоязычных источниках Environmental Data Envelopment Analysis, E-DEA) активно развивается в работах зарубежных [11–12, 16–18, 20–21] и российских ученых [6–7] как перспективный подход, позволяющий успешно решать комплексные задачи управления, связанные с переводом экономических систем на устойчивый путь развития, обеспечивающий экономический рост при максимально бережном потреблении природных ресурсов и минимально возможной нагрузке на

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-06-00147_а «Разработка моделей анализа среды функционирования для оптимизации траекторий развития региональных экономических систем по экологическим параметрам».

² Светлана Валерьевна Ратнер, д.э.н. (lanarat@mail.ru).

окружающую среду. В отличие от традиционного анализа среды функционирования (DEA), в моделях E-DEA производственные объекты могут иметь не только желательные выходы, в качестве которых, как правило, рассматриваются различные виды производимой полезной продукции (или ценности, создаваемые предприятием в том случае, если оно не является производством в обычном понимании), но и нежелательные выходы, сопутствующие основному производственному процессу. Обычно в качестве нежелательных выходов рассматриваются негативные экологические эффекты производственной (или любой другой экономической) деятельности предприятия. Наличие нежелательных выходов существенно усложняет решение задач анализа среды функционирования (АСФ), так как нарушает одно из основных свойств множества производственных возможностей (Production Possibility Set, PPS) P , а именно свойство монотонности. Подробнее с данной проблемой можно ознакомиться в работах [8, 14], а также монографии [1].

В серии недавних работ автора с ближайшими коллегами и учениками [3–5] было показано, что в широком классе практических задач экологического менеджмента возможно использование моделей экологического АСФ в упрощенной постановке, когда нежелательные выходы производственной деятельности изучаемых однородных экономических агентов рассматриваются в базовых моделях АСФ как входы. При таком подходе логика решаемой оптимизационной задачи полностью сохраняется: виртуальный вход (взвешенная линейная композиция входов) минимизируется, а виртуальный выход (взвешенная линейная композиция выходов) производственного объекта максимизируется. Кроме того, такой подход к работе с нежелательными выходами позволяет сохранить свойство строгой монотонности множества производственных возможностей. В результате решения оптимизационной задачи АСФ эффективными признаются те производственные объекты (или системы), которые при максимальном объеме выпуска полезной продукции производят наименьшее негативное воздействие на окружающую среду.

При рассмотрении «статических» случаев, т.е. задач управления эколого-экономической эффективностью производственных объектов, тот факт, что объект признан эффективным, чаще

всего говорит о том, что он использует наилучшие доступные на текущем уровне технологического развития производственные технологии и имеет эффективную систему экологического менеджмента. Для неэффективных объектов вычисляются целевые значения входов (в случае задачи ориентированной по входам, input-oriented) или выходов (в случае задачи ориентированной по выходам, output-oriented), достижение которых позволит им стать эффективными.

При этом варианты возможного достижения целевых параметров на практике у каждого производственного объекта могут быть разными: это может быть модернизация производства, введение системы экологического менеджмента на предприятии, реализация инвестиционных проектов природоохранного характера и т.д. В том же случае, когда задача экологического АСФ решается для таких сложных и масштабных объектов как региональные экономические системы, характеризующиеся большим разнообразием производственных процессов, продвижение к границе эффективности может происходить, в том числе, и за счет изменения структуры региональной экономики, отказу от ресурсоемких и «грязных» производств в пользу развития наукоемких секторов экономики. Очевидно, что все вышеперечисленные процессы, имеющие своей целью повышение эколого-экономической эффективности производственного объекта, распределены во времени и не имеют мгновенного эффекта, поэтому с точки зрения практики особый интерес представляют продвинутые методы АСФ, позволяющие исследовать вопросы сравнительной эффективности их деятельности в динамике.

В большинстве литературных источников, посвященных изучению особенностей динамических задач анализа среды функционирования, подчеркивается тот факт, что изменение значений меры эффективности производственного объекта в течение наблюдаемого периода времени может быть обусловлено, как непосредственно изменением его производительности, так и смещением границы эффективности, вызванного изменениями в производительности других производственных объектов референтного множества [13, 15, 19].

Для преодоления сложностей интерпретации динамики коэффициента эффективности предлагаются два основных подхода, один из которых основан на разложении коэффициента эффективности на две составляющие (относительно границы эффективности предшествующего и наблюдаемого момента времени) [13], а второй предполагает рассмотрение одного и того же производственного объекта в разные моменты времени, как разные производственные объекты [19]. При этом ни в первом, ни во втором подходе не учитываются такие важные особенности широкого класса производственных процессов, как наличие отложенного эффекта от использования какого-либо ресурса (например, от инвестиций в исследования и разработки) или использование ресурсов, накопленных за предшествующие периоды жизненного цикла производственного объекта (например, расходование средств фондов развития) (рис. 1).



Рис. 1 Экономическая логика распределенного во времени эффекта от использования ресурса

Первые попытки преодолеть данные недостатки динамических моделей анализа среды функционирования предприняты в [15], где предлагается учитывать тип переменных, используемых в модели АСФ в качестве входов, и работать с переменными типа запаса специальным образом: рассматривать их как отдельный вход в первый момент времени и как выход в последний момент времени из всего наблюдаемого периода (окна траектории производственного объекта).

При данном подходе необходимо также осуществить переход от рассмотрения эффективности производственного объекта в каждый определенный момент времени к изучению *пути* развития производственного объекта. Такие модификации метода анализа среды функционирования изменяют постановку оптимизационной задачи и, что самое главное, накладывают определённые дополнительные ограничения на свойства множества производственных возможностей, несовместимые с некоторыми постулатами экологического АСФ, в частности с постулатом нестрогой монотонности.

Целью настоящей работы является адаптация подхода, предложенного в работе [10] к решению задач традиционного АСФ для производственных объектов, чья деятельность характеризуется множеством переменных двух разных типов – переменных запаса и переменных потока, к задачам экологического АСФ. Изучаются ограничения, которые необходимо дополнительно наложить на свойства множества производственных возможностей. Предлагается постановка задачи для оценки сравнительной эффективности региональных систем экологического менеджмента, функционирующих на определенном временном интервале. Приводится расчетный пример для оценки сравнительной эффективности систем экологического менеджмента регионов Центрального Федерального округа в период с 2010 по 2014 гг.

2. Свойства множества производственных возможностей в динамических моделях анализа среды функционирования с переменными типа запаса и типа потока

Фундаментальным свойством моделей DEA является соответствие между входами и выходами производственных объектов в каждый рассматриваемый момент времени. Для того чтобы учесть распределенное по времени влияние входов на выходы, необходимо внести некоторые изменения в определение множества производственных возможностей (Production Possibility Set, PPS) модели DEA.

Следуя подходу, предложенному в [10], обозначим через $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T})$ оцениваемую траекторию (или путь развития)

j -го ПО ($j = 1, 2, \dots, M$). Тогда рассматриваемому множеству производственных возможностей P

$$P = \{(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \mid x_j^{1,2,\dots,T} \text{ могут произвести } y_j^{1,2,\dots,T}\}.$$

будут присущи следующие свойства:

1) P непустое множество. Все наблюдаемые траектории $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T})$, $j = 1, 2, \dots, N$, составляют P ;

2) P является строго монотонным по входам, т.е. если $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$ и $\mathbf{x}^{1,2,\dots,T} \geq x_j^{1,2,\dots,T}$, то $(\mathbf{x}^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$, где $\mathbf{x}^{1,2,\dots,T} \geq x_j^{1,2,\dots,T}$, понимается как $\mathbf{x}^t \geq x_j^t$ для $t = 1, 2, \dots, T$ и $\mathbf{x}^t \geq x_j^t$ обозначает, что хотя бы один элемент \mathbf{x}^t больше, чем соответствующий элемент x_j^t .

3) P является строго монотонным по выходам, т.е. если $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$ и $\mathbf{y}^{1,2,\dots,T} \leq y_j^{1,2,\dots,T}$, то $(\mathbf{x}^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$.

4) Если $y_j^{1,2,\dots,T} \geq 0$, то $(0, y_j^{1,2,\dots,T}) \notin P$ (на один выход не может быть произведен без входа).

5) Постоянный эффект масштаба: если $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$, то $\forall \lambda > 0 (\lambda x_j^{1,2,\dots,T}, \lambda y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$;

6) P является наименьшим замкнутым выпуклым множеством, удовлетворяющим условиям (1)–(5).

Множество производственных возможностей, которое удовлетворяет условиям (1)–(5) может быть построено из всех наблюдаемых путей $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T})$, $j = 1, 2, \dots, N$, следующим образом:

$$P = \left\{ (x^{1,2,\dots,T}, y^{1,2,\dots,T}) \mid x^{1,2,\dots,T} \geq \sum_j \lambda_j x_j^{1,2,\dots,T}; y^{1,2,\dots,T} \leq \sum_j \lambda_j y_j^{1,2,\dots,T}; \lambda_j > 0 \right\}.$$

Далее при построении множества производственных возможностей необходимо выделить тот факт, что объем запаса, оставшийся у производственного объекта на конечный момент наблюдаемого временного периода, может быть использован в его дальнейших периодах жизненного цикла для увеличения выходов (объемов полезной продукции). Для этого явным образом выделим переменную, имеющую тип запаса и будем рассматривать ее в начальный момент оцениваемого периода, внутри оцениваемого периода времени и в конечный момент оцениваемого периода времени (рис. 2):

$Z^{\tau-1}$ – значение переменной запаса в начальный момент оцениваемого временного окна $\tau, \tau + 1, \dots, \tau + T$;
 $z^{\tau, \tau+1, \dots, \tau+T}$ – изменения значения переменной запаса в каждый момент времени из оцениваемого временного окна;
 $Z^{\tau+T}$ – значение переменной запаса в конечный момент оцениваемого временного окна.

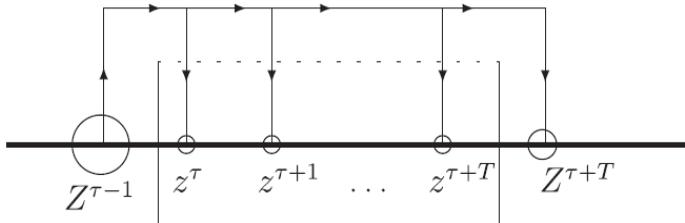


Рис. 2. Иллюстрация основного принципа учета переменной запаса в динамической модели АСФ

Очевидно, что, следуя общей логике моделей анализа среды функционирования, $Z^{\tau-1}$ должно рассматриваться как вход (подлежать минимизации в задачах, ориентированных на входы, input-oriented), а $Z^{\tau+T}$ – как выход (подлежать максимизации в задачах, ориентированных по выходу, output-oriented). Тогда производственные объекты, обладающие наименьшими запасами в начальный момент времени и наибольшими запасами в конечный момент времени, при прочих равных условиях будут признаны наиболее эффективными. Рассматривая $z^{\tau, \tau+1, \dots, \tau+T}$ так же, как входы, получим следующее определение множества производственных возможностей:

$$\begin{aligned}
 P = & \left\{ (x^{\tau, \dots, \tau+T}, z^{\tau, \dots, \tau+T}, y^{\tau, \dots, \tau+T}) \mid \right. \\
 (1) \quad & x_i^t \geq \sum_j \lambda_j x_{ij}^t; \quad z_i^t \geq \sum_j \lambda_j z_{ij}^t; \quad y_i^t \leq \sum_j \lambda_j y_{ij}^t \\
 & \forall t = \tau, \dots, \tau + T \\
 & \left. Z_i^{\tau-1} \geq \sum_j \lambda_j Z_{ij}^{\tau-1}; \quad Z_i^{\tau+T} \leq \sum_j \lambda_j Z_{ij}^{\tau+T}, \quad \forall \lambda_j \geq 0 \right\}.
 \end{aligned}$$

Содержательно данное определение множества производственных возможностей означает, что если в каждый момент времени θ определенный объем полезных выходов y_i может быть произведен на основе использования некоторого фиксированного количества входных ресурсов x_i и запаса $Z^{\tau-1}$ и $z^{\tau, \tau+1, \dots, \tau+\theta}$, то этот же объем полезных выходов может быть произведен и при большем объеме используемых ресурсов и запасов. То есть свойство строгой монотонности распространяется и на все значения переменной запаса.

Заметим, что определение (1) может быть легко обобщено на случай, когда экономическая активность производственных объектов характеризуется использованием не одной, а сразу нескольких переменных запаса. В таком обобщенном случае каждое начальное значение и все промежуточные значения учитываемых переменных запаса должны рассматриваться как входы, а все конечные значения переменных запаса – как выходы.

3. Постановка задачи для оценки сравнительной эффективности путей развития производственных объектов с переменными запаса и потока

Рассмотрим прямую форму модели CCR [9], ориентированной по входам, с радиальной мерой эффективности для случая задачи оценки сравнительной эффективности траекторий производственного объекта с индексом 0 в присутствии одной или нескольких переменной типа запаса:

$$(2) \quad \text{Min} \frac{\sum_{t=\tau}^T \alpha^t}{T} - \varepsilon \left(\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{i=1}^M S_i^{t-} + \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{i=1}^L \delta_i^{t-} + \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{r=1}^R S_r^{t+} + \sum_{i=1}^K \gamma_i^- + \sum_{i=1}^K \gamma_i^+ \right)$$

при ограничениях

$$U1: \sum_{j=1}^N \lambda_j x_{ij}^t = \alpha^t x_{ij0}^t - S_i^{t-} \quad \forall i = \overline{1, M} \quad \forall t = \overline{\tau, T},$$

$$У2: \sum_{j=1}^N \lambda_j z_{ij}^t = \alpha^t z_{ij0}^t - \delta_i^{t-} \quad \forall i = \overline{1, L} \quad \forall t = \overline{\tau, T},$$

$$У3: \sum_{j=1}^N \lambda_j y_{rj}^t = y_{rj0}^t + S_r^{t+} \quad \forall i = \overline{1, R} \quad \forall t = \overline{\tau, T},$$

$$У4: \sum_{j=1}^N \lambda_j Z_{ij}^{\tau+T} = Z_{ij0}^{\tau+T} + \gamma_i^+ \quad \forall i = \overline{1, L},$$

$$У5: \sum_{j=1}^N \lambda_j Z_{ij}^{\tau-1} = Z_{ij0}^{\tau-1} - \gamma_i^- \quad \forall i = \overline{1, L};$$

где все $\lambda_j, S_i^{t-}, \delta_i^{t-}, S_r^{t+}, \gamma_i^+, \gamma_i^-$ – неотрицательные величины, M – количество входов ПО, определяемых как переменные потока, L – количество входов, определяемых как переменные запаса, R – количество выходов ПО, определяемых как переменные потока, N – общее количество ПО в референтном множестве.

Нетрудно заметить, что ограничение У1 является условием, накладываемым на входные переменные типа потока, ограничение У2 накладываемое на промежуточные значения переменных типа запаса, У3 является ограничением для выходных переменных типа потока, У4 и У5 являются ограничениями, накладываемые соответственно на начальное и конечное значение переменных типа запаса.

Общая эффективность производственного объекта на рассматриваемом временном интервале определена как среднее арифметическое всех значение коэффициентов эффективности за рассматриваемый временной промежуток.

Решение задачи (2) определяет траекторию (x_i^t, y_r^t) из множества P , такую что

$$\begin{aligned}
 x_i^t &= \sum_{j=1}^N \lambda_j^* x_{ij}^t = \phi_i^* x_{ij0}^t - \delta_i^{t-*}, \\
 (3) \quad z_l^t &= \sum_{j=1}^N \lambda_j^* z_{lj}^t = \phi_l^* z_{lj0}^t - \delta_l^{t-*}, \\
 y_r^t &= \sum_{j=1}^N \lambda_j^* y_{ij}^t = y_{ij0}^t + S_r^{t+*}, \\
 i &= \overline{1, M}; \quad r = \overline{1, R}; \quad l = \overline{1, L}; \quad t = \overline{\tau, T}.
 \end{aligned}$$

Заметим, что в формуле (2) предложено рассчитывать коэффициент эффективности пути развития производственного объекта как среднее арифметическое коэффициентов эффективности в каждый момент времени из наблюдаемого интервала. На практике использование такого усреднённого показателя может привести к потере информативности. Например, два объекта с одинаковой итоговой мерой эффективности могут иметь разные пути: один производственный объект может наращивать свою эффективность при продвижении от момента τ к моменту времени T , а другой, наоборот, терять. Очевидно, что первый случай является более предпочтительным, так как существует определенная вероятность сохранения той же динамики развития производственного объекта в будущем. Поэтому представляется целесообразным использовать другие средние значения, например, среднее геометрическое или среднее гармоническое. Однако использование более сложных конструкций средних значений может вести к повышению вычислительной сложности оптимизационной задачи (2).

4. Постановка задачи для оценки сравнительной эффективности региональных систем экологического менеджмента на временном промежутке

В отличие от задач оценки сравнительной эколого-экономической эффективности региональных экономических систем, постановка и решение которых описаны в работах [3, 4], задачи оценки эффективности региональных систем

экологического менеджмента должны учитывать не только степень «экологичности» экономики региона, но и эффективность различного рода мероприятий, направленных на улучшение состояния окружающей среды. Это означает, что помимо различных негативных экологических эффектов, производимых региональной экономикой и сектором ЖКХ, являющихся, по сути, нежелательными выходами производственных процессов и рассматриваемых в задачах экологического АСФ как входы, в модели должны появиться и другие входы, отображающие ресурсы, затрачиваемые на экологические инновации и природоохранные мероприятия. То есть логика задачи оценки эффективности приобретает схему, представленную на рис. 3.



Рис. 3 Логика построения оптимизационной задачи для оценки эффективности региональной системы экологического менеджмента

На рис. 3 в прямоугольник заключены входы и выходы производственного объекта (представляющего в данном случае региональную систему экологического менеджмента), подлежащие минимизации, а в прямоугольник с закругленными углами – выходы, подлежащие максимизации. Региональная система экологического менеджмента представлена как надстройка (точнее, оболочка) для региональной экономической системы. Это отражает тот факт, что результаты деятельности системы

экологического менеджмента не могут рассматриваться отдельно, в отрыве от деятельности самой экономической системы.

Входная переменная «затраты на охрану окружающей среды», вообще говоря, может рассматриваться как вход непосредственно системы экологического менеджмента, а переменная «инвестиции в основной капитал» – как вход экономической системы региона, однако, следуя логике АСФ, рассматривающего производственные объекты как систему типа «черный ящик», такое разделение не является необходимым и представлено на схеме только для иллюстрации предлагаемого подхода к постановке задачи.

Необходимо отметить, что на рис. 3 также представлена одна переменная, которая заключена внутри прямоугольника, обозначающего региональную систему экологического менеджмента. Эта переменная отражает стоимость основных фондов и является по своему типу переменной запаса. Учет чисто экономических параметров, таких как инвестиции в основной капитал в региональной экономике и стоимость основных фондов, не имеющих прямого отношения к вопросам экологии, позволяет адекватно отразить влияние (как правило, положительное) на окружающую среду модернизационных процессов, зачастую основанных в современной экономической ситуации на внедрении более энергоэффективных и менее ресурсоемких технологий.

Тогда, следуя представленной на рис. 3 логике и схеме постановки оптимизационной задачи, рассмотренной в предыдущем параграфе, введем следующие наборы выходных и выходных переменных:

x_{1j}^t – выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от автомобильного транспорта в году t , тыс. тонн;

x_{2j}^t – выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в году t , тыс. тонн;

x_{3j}^t – сброс неочищенных сточных вод в природные водоемы в году t , млн куб. м;

x_{4j}^t – забор воды из природных водоемов в году t , млн куб. м;

x_{5j}^t – инвестиции в основной капитал в году t , млн руб.;

x_{6j}^t – текущие затраты на охрану окружающей среды в году t , млн руб.;

$Z^{\tau-1}$ – стоимость основных фондов в регионе на начало оцениваемого периода, млн. руб.;

$z^{\tau, \tau+1, \dots, \tau+T}$ – стоимость основных фондов в регионе в рассматриваемый период, млн руб.;

$Z^{\tau+T}$ – стоимость основных фондов на конец рассматриваемого периода, млн руб.;

y_{1j}^t – валовый региональный продукт в году t , млн руб.;

y_{2j}^t – население региона в году t , тыс. чел.

Решение данной оптимизационной задачи позволит выделить те региональные системы экологического менеджмента, которые позволяют экономике региона производить наименьшие негативные воздействия на окружающую среду при наибольшем объеме производимого ВРП и количестве населения за счет наиболее эффективного использования текущих затрат на охрану окружающей среды, инвестиций в основной капитал и максимального накопления стоимости основных фондов. То есть по сравнению с постановками задачи, предложенными в работах [3–4], данный подход позволяет не только оценить эффективность региональных экономических систем в экологическом плане, но и понять, за счет чего она достигнута.

Следует отметить, что при использовании модели (2) и множества производственных возможностей вида (1) учет нежелательных выходов через работу с ними как с входами производственных объектов является *единственным* возможным подходом, так как свойства множества P включают свойство монотонности по входам и выходам.

Рассмотрим вопрос о том, насколько предложенный подход адекватно отражает ситуацию эколого-экономической эффективности траекторий развития региональных систем на примере регионов Центрального федерального округа, как территориальных объектов с наиболее высокой плотностью населения и уровнем воздействия экономики на окружающую среду. Выбор

периода наблюдения с 2010 по 2014 гг. позволит сравнить полученные результаты с результатами расчетов коэффициентов эколого-экономической эффективности региональных экономических систем, выполненных в работе [2] без учета переменной запаса, и сделать выводы относительно информативности предложенного в настоящей работе подхода.

5. Оценка сравнительной эффективности систем экологического менеджмента регионов Центрального Федерального округа в период с 2010 по 2014 гг.

Исходные статистические данные для расчетов взяты из статистического ежегодного сборника «Регионы России. Социально-экономические показатели» за 2012–2017 гг. (www.gks.ru) и из ежегодных государственных докладов Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «О состоянии и об охране окружающей среды в российской Федерации» за период 2010–2014 гг. (<http://www.mnr.gov.ru>). Так как в расчетах используются данные за временной период 5 лет, представленные в денежном выражении, предварительно все стоимостные величины методом цепных индексов были приведены к ценам базового периода, в качестве которого взят 2010 год.

В результате последовательного решения четырех задач ССР¹, ориентированных по входам и одной задачи ССР, ориентированной по выходам, получены значения коэффициентов эффективности представленные в таблице 1.

Как показывают проведенные расчеты, 10 из 17 рассмотренных регионов демонстрируют на всем наблюдаемом временном интервале максимальную эффективность в сфере экологического менеджмента. Это Белгородская, Брянская, Владимирская, Ивановская, Калужская, Костромская, Курская, Московская, Орловская и Тамбовская области. К неэффектив-

¹ Аббревиатура ССР широко используется в литературе по анализу среды функционирования для обозначения класса моделей с постоянным эффектом масштаба. Введена по первым буквам имен разработчиков Chames, Cooper, Rhodes.

ным регионам отнесены Воронежская, Липецкая, Рязанская, Смоленская, Тверская, Тульская и Ярославская области. Причем наименьшую эффективность в плане экологического менеджмента демонстрируют Тульская и Липецкая области.

Таблица 1. Коэффициенты эффективности систем экологического менеджмента регионов ЦФО в 2010–2014 гг.

Регион	2010	2011	2012	2013	2014	$\alpha_{геом}$	$\alpha_{арифм}$
Белгородская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Брянская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Владимирская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Воронежская обл.	0,969	0,937	0,950	0,908	0,934	0,940	0,940
Ивановская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Калужская область	1	1	1	1	1	1	1
Костромская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Курская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Липецкая обл.	0,878	0,851	0,826	0,832	1	0,875	0,877
Московская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Орловская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Рязанская обл.	0,900	0,970	0,973	0,889	1	0,945	0,946
Смоленская обл.	0,952	0,945	0,971	1	1	0,973	0,974
Тамбовская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Тверская обл.	0,862	0,831	0,903	0,947	0,967	0,901	0,902
Тульская обл.	0,849	0,840	0,814	0,812	0,876	0,838	0,838
Ярославская обл.	0,799	0,854	0,925	0,984	1	0,909	0,913

Заметим, что общий коэффициент эффективности за рассматриваемый период был рассчитан и как среднее арифметическое однолетних показателей, и как среднее геометрическое. В данном случае особой разницы между ними не наблюдается, поэтому будем использовать наиболее простой – среднее арифметическое – как показатель эффективности пути развития региона в контексте баланса экономики и экологии.

Для сравнения полученных результатов с результатами расчетов эколого-экономической эффективности, выполненных без учета стоимостных входов (переменной типа запаса, отражающей стоимость основных фондов и переменной, ответственной за инвестиции в основной капитал), приведем таблицу из [2].

Таблица 2. Значения коэффициентов эколого-экономической эффективности регионов ЦФО, рассчитанные точечным методом без учета стоимостных входов. Источник: [2]

Регион	2010	2011	2012	2013	2014
Белгородская обл.	1	1	1	1	1
Брянская обл.	1	1	1	1	1
Владимирская обл.	1	1	1	1	1
Воронежская обл.	1	1	1	1	1
Ивановская обл.	0,7868	0,7868	0,8301	0,8548	0,7969
Калужская обл.	1	1	1	1	1
Костромская обл.	1	0,9126	0,9124	0,8283	0,8710
Курская обл.	1	1	1	1	1
Липецкая обл.	1	1	1	1	1
Московская обл.	1	1	1	1	1
Орловская обл.	0,9807	0,9733	1	0,9509	1
Рязанская обл.	0,8022	0,7974	0,7460	0,7372	0,6928
Смоленская обл.	0,9086	0,9839	0,8283	0,8209	0,9445
Тамбовская обл.	1	1	1	1	1
Тверская обл.	1	1	1	1	1
Тульская обл.	0,8579	0,8136	0,7896	0,6681	0,6258
Ярославская обл.	0,9164	0,9452	0,9292	1	1

Опуская некоторые малосущественные моменты, основные различия в результатах работы [2] и настоящей работы можно подытожить следующим образом:

1) Воронежская, Липецкая и Тверская области признаны эффективными на всем временном промежутке без учета стоимостных входов (назовем условно данную модель моделью А), тогда как в случае учета переменной типа запаса и стоимостного входа, отражающего инвестиции в основной капитал (модель В), они перестают быть эффективными;

2) Ивановская, Костромская и Орловская области признаны неэффективными без учета стоимостных входов (модель А), в то время как с учетом стоимостных входов (модель В) они демонстрируют максимальную эффективность.

Для того чтобы дать выявленным различиям обоснованную экономико-управленческую интерпретацию, рассмотрим более детально динамику экономических и экологических показателей в нескольких регионах – представителях разных типов региональных систем экологического менеджмента: Владимирской области – как региона, признанного эффективным по результатам расчетов по обеим моделям (с учетом стоимостных входов и без такового), Воронежской области – как региона, признанного эффективным по модели без учета стоимостных входов и неэффективным с учетом таковых и Ивановской области – как региона, признанного неэффективным по модели без учета стоимостных входов и эффективным с учетом таковых. На рис. 4–7 представлена динамика некоторых «наиболее говорящих» входных и выходных параметров модели.

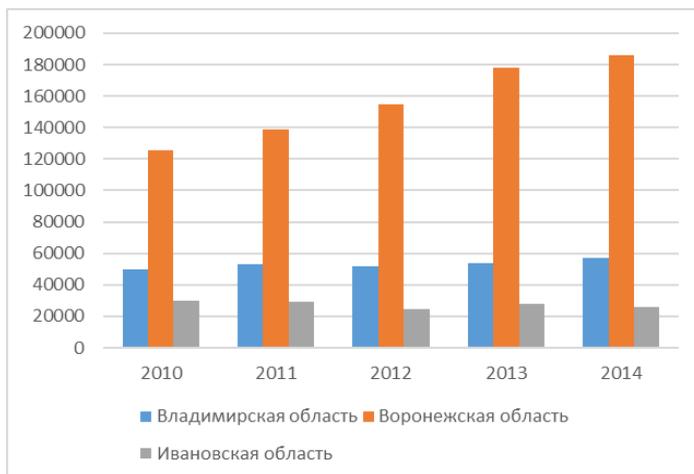


Рис. 4 Динамика инвестиций в основной капитал (млн руб. в ценах 2010 года) в модельных регионах



Рис. 5 Динамика текущих затрат на охрану окружающей среды (млн руб. в ценах 2010 года) в модельных регионах

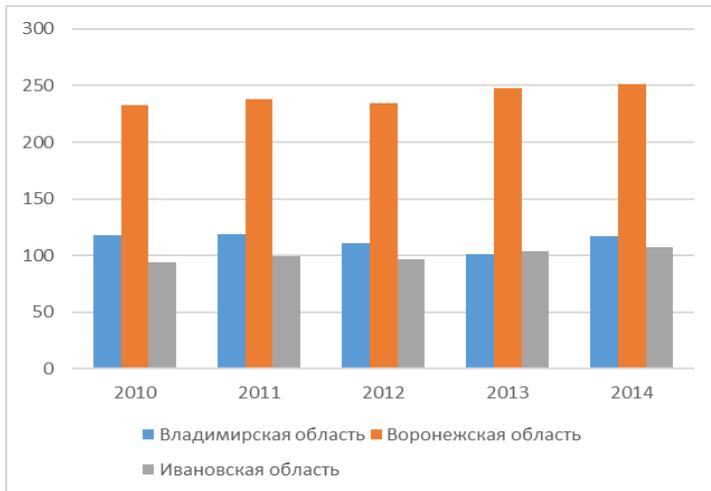


Рис. 6 Динамика выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта (тыс. тонн) в модельных регионах

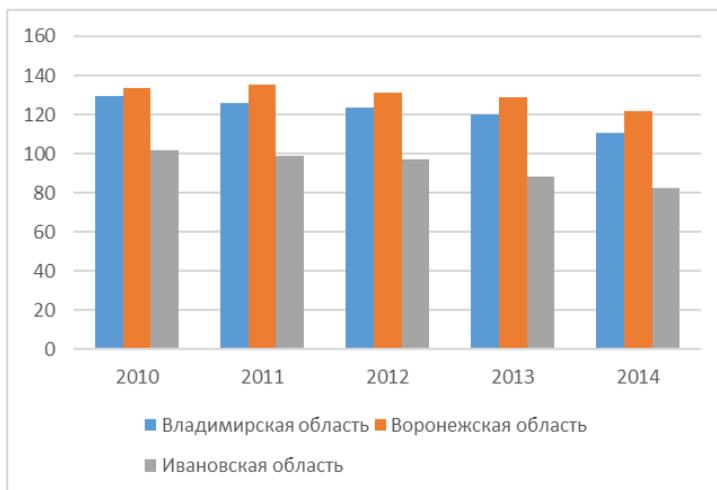


Рис. 7 Динамика сброса неочищенных сточных вод (млн куб. м) в модельных регионах



Рис. 8 Динамика ВРП (млн руб. в ценах 2010 года) в модельных регионах

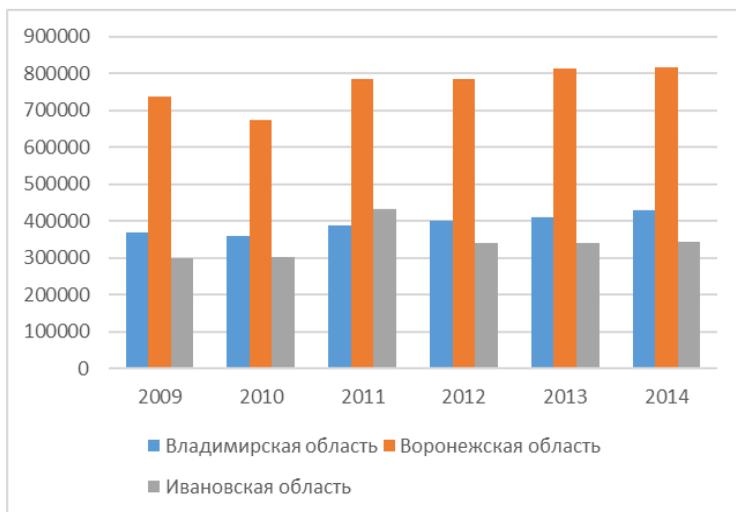


Рис. 9 Стоимость основных фондов (млн руб. в ценах 2010 года) в модельных регионах¹

Анализируя данные, представленные на рис. 4–8, можно сделать следующие выводы:

1. Активное наращивание объемов инвестиций в основной капитал, происходящее в Воронежской области в рассматриваемый период, привело к существенному увеличению валового регионального продукта, при этом существенного снижения негативного воздействия на окружающую среду не производилось, а по некоторым показателям (например, выбросы от автомобильного транспорта) оно увеличилось. Текущие затраты на охрану окружающей среды в течение наблюдаемого периода были подвержены колебаниям, но существенно не изменились, стоимость основных фондов выросла незначительно. Такой тип развития можно определить как экстенсивный, когда рост экономики происходит за счет увеличения потребления природных ресурсов и нагрузки на окружающую среду.

¹ Так как в статистических сборниках стоимость основных фондов указывается на конец года, то в качестве начального значения за рассматриваемый период взята стоимость на конец 2009 года, а в качестве последнего значения – стоимость на конец 2014 года.

2. Рост ВРП Владимирской области происходил без существенного увеличения инвестиций в основной капитал и сопровождался снижением негативного воздействия на окружающую среду и объемов текущих затрат на охрану окружающей среды. Стоимость основных фондов монотонно возрастала на протяжении всего наблюдаемого периода. Такой тип развития можно определить как интенсивный, когда рост экономики происходит за счет качественного улучшения экологических характеристик процессов производства и потребления.

3. Экономика Ивановской области осталась на уровне 2010 года по объему ВРП при снижении объемов инвестиции в основной капитал, снижении или заморозке негативного воздействия на окружающую среду, снижении текущих затрат на охрану окружающей среды. Стоимость основных фондов за исследуемый период испытала рост, но в целом осталась стабильной.

Сопоставляя данные наблюдения с различиями в результатах оценки эколого-экономической эффективности региональных систем в соответствии с подходом, предложенным в [3] и примененным для регионов ЦФО в [2] (модель А) и результатами оценки эффективности систем экологического менеджмента с учетом стоимостных входов (модель В), предложенной в настоящей работе, нетрудно заметить, что модель А лучше отражает количественные изменения, связанные с ростом экономики региона, тогда как модель В позволяет отследить качественные изменения, связанные со сменой типа развития экономики.

6. Заключение

Задачи регионального экологического менеджмента, характеризующиеся высокой сложностью, обусловленной наличием большого количества плохо наблюдаемых связей между ресурсами и результатами процессов производства и потребления, требуют разработки специальных методов и подходов, позволяющих выявить указанные латентные зависимости и представить их в форме, доступной для интерпретации и использования в процессе принятия решений. Большие возможности в этом плане представляет множество методов непараметрической

оптимизации под обобщенным названием экологический анализ среды функционирования.

На современном этапе развития методологии АСФ большинство методов разработаны для случая, когда все результаты деятельности изучаемых производственных объектов являются желательными и подлежат максимизации в процессе решения задачи, тогда как в экологическом анализе среды функционирования это базовое положение нарушается. Поэтому адаптация методов традиционного АСФ к ситуациям, когда некоторые выходы производственного объекта являются нежелательными, является актуальным трендом развития методологии анализа среды функционирования. Особый интерес в этом плане представляют малоизученные динамические задачи экологического АСФ.

Основным результатом настоящего исследования является обобщение динамической модели традиционного АСФ с учетом разделения входных переменных по типам запаса и потока на случай экологического анализа среды функционирования.

В качестве производственных объектов в модели рассматриваются региональные системы экологического менеджмента, на вход которых поступают ресурсы, измеренные в денежном выражении: текущие затраты на охрану окружающей среды (отражают прямое воздействие региональной системы экологического менеджмента на состояние окружающей среды) и инвестиции в основной капитал (отражают косвенное влияние модернизационных процессов в экономике на состояние окружающей среды). Учет переменной типа запаса – стоимости основных фондов – на начальном и конечном периодах рассматриваемого временного интервала позволяет проследить распределенный по времени эффект данного ресурса, а также включить в определение эффективности региона способность к накоплению данного вида ресурса.

Проведенные серии расчетов по построенной модели непараметрической оптимизации и сравнение их с результатами предыдущих исследований позволили сделать вывод о том, что предложенная модель позволяет отследить качественные изменения, связанные со сменой типа развития экономики, и отнести к эффективным только объекты с интенсивным типом развития,

когда рост экономики происходит за счет качественного улучшения экологических характеристик процессов производства и потребления.

Численная реализация предложенной модели может быть осуществлена с помощью прикладного программного обеспечения открытого доступа, что повышает вероятность ее успешного практического использования в процессах экологического менеджмента на региональном уровне.

Литература

1. КРИВОНОЖКО В.Е., ЛЫЧЕВ А.В. *Моделирование и анализ деятельности сложных систем.* – М.: ЛЕНАНД, 2013. – 256 с.
2. РАТНЕР С.В. *Динамические задачи оценки эколого-экономической эффективности регионов на основе базовых моделей анализа среды функционирования* // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 67. – С. 81–106.
3. РАТНЕР С.В. *Задачи оптимизации траекторий развития региональных экономических систем по экологическим параметрам* // Друкерровский вестник. – 2016. – №2. – С. 30–41.
4. РАТНЕР С.В., АЛМАСТЯН Н.А. *Метод согласования экологических приоритетов энергетических компаний и региональных социо-экономических систем* // Инновации. – 2016. – №9. – С. 40–47.
5. РАТНЕР С.В., ИОСИФОВ В.В. *Оценка уровня развития процессных экологических инноваций* // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2016. – №34. – С. 2–11.
6. ХРУСТАЛЕВ Е.Ю., РАТНЕР П.Д. *Анализ экологической эффективности электроэнергетических компаний России на основе методологии анализа среды функционирования* // Экономический анализ: теория и практика. – 2015. – №35. – С. 33–42.
7. ХРУСТАЛЕВ Е.Ю., РАТНЕР П.Д. *Эко-инновации в электроэнергетике: оценка сравнительной эффективности* // Инновации. – 2015. – № 9. – С. 8–14.
8. CHUNG Y.H., FARE R., GROSSKOPF S. *Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach* //

- Journal of Environmental Management. – 1997. – No. 51. – P. 229–240.
9. COOPER W.W., SEIFORD L.M., TONE T. *Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses: With DEA-Solver Software and References*. – Springer, New York. 2006. – 388 p.
 10. EMROUZNEJAD A., THANASSOULIS E. *A mathematical model for dynamic efficiency using data envelopment analysis analysis* // Applied Mathematics and Computation. – 2005. – No. 160. – P. 363–378.
 11. FARE R., GROSSKOPF S., HERNANDEZ-SANCHO F. *Environmental performance: An index number approach* // Resource and Energy Economics. – 2004. – No. 26. – P. 343–352.
 12. KORHONEN P.J., LUPTACIK M. *Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis* // European Journal of Operational Research. – 2004. – No. 154. – P. 437–446.
 13. MALMQUIST S. *Index numbers and indifference surfaces* // Trabajos de Estadística. – 1953. – No. 4. – P. 209–242.
 14. SEIFORD L.M., ZHU J. *Modelling undesirable factors in efficiency evaluation* // European Journal of Operational Research. – 2002. – No. 142. – P. 16–20.
 15. TONE K., TSUTSUI M. *Dynamic DEA: A slacks-based measure approach* // Omega. – 2010. – Vol. 38, Iss. 3–4. – P.145–156.
 16. TYTECA D. *Linear programming models for the measurement of environmental performance of firms – concepts and empirical results* // Journal of Productivity Analysis. – 1997. – No. 8. – P. 183–197.
 17. TYTECA D. *On the measurement of the environmental performance of firms – a literature review and a productive efficiency perspective* // Journal of Environmental Management. – 1996. – No. 46. – P. 281–308.
 18. VALADKHANI A., ROSHDI I., SMYTH R. *A multiplicative environmental DEA approach to measure efficiency changes in the world's major polluters*. // Energy Economics. – 2016. – Vol. 54. – P. 363–375.

19. WU H., SHI Y., ZHU W. *Effectiveness of the policy of circular economy in China: A DEA-based analysis for the period of 11th five-year-plan* // Resources, Conservation and Recycling. – 2014. – No. 83. – P. 163–175.
20. ZHOU P., ANG B.W., POH K.L. *A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies* // European Journal of Operational Research. – 2008. – No. 189. – P. 1–18.
21. ZHOU P., ANG B. W., POH K. L. *Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies* // Energy Economics. – 2008. – Vol. 30, Iss. 1. – P. 1–14.

DYNAMIC MODELS OF ENVIRONMENTAL DATA ENVELOPMENT ANALYSIS WITH STOCK AND FLOW VARIABLES

Svetlana Ratner, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, Leading researcher (lanarat@mail.ru).

Abstract: The paper devoted to the elaboration of methodological approach to the solution of dynamic problems of Environmental Data Envelopment Analysis for production facilities, whose activities are characterized by a set of variables of two different types - stock variables and flow variables. The limitations that are additionally imposed on the Production Possibility Set are studied. A task is set for assessing the comparative effectiveness of regional systems of environmental management that operate at a certain time interval. A computational example is given for assessing the comparative effectiveness of environmental management systems in the regions of the Central Federal District in the period from 2010 to 2014. The possibilities of using the developed method in practice are discussed.

Key words: data envelopment analysis, dynamic models, ecological effectiveness, regional economy, ecological management.

УДК 338.2

ББК 65.05.3

DOI: 10.25728/ubs.2018.76.3

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Р.М. Нижегородцевым.

Поступила в редакцию 24.07.2018.

Опубликована 30.11.2018.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Селезнева И. Е.¹

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Изучается проблема повышения качества государственного стратегического планирования и прогнозирования. Предполагается, что для выработки управленческих решений в ходе так называемых системных исследований строится модель управляемой системы. Для анализа влияния организации процесса системных исследований на качество получаемой модели и, в конечном счете, на качество стратегических управленческих решений разработаны математические модели этого процесса, а также принятия стратегических решений и их влияния на общественное благосостояние. Для этого был описан процесс формирования оценочной функции полезности общества. Формализованы точность и качество управленческих решений, принимаемых на основе максимизации этой функции. Описаны условия «робастности» управляемой системы (предприятия, отрасли, национальной экономики) к искажениям целевой функции общества и оптимальной политики. Определяется ожидаемое количество учтенных факторов из общего числа потенциально значимых факторов в зависимости от количества экспертов, принимающих участие в системных исследованиях. Это позволяет оценить минимально допустимое, «пороговое» количество экспертов, необходимое для построения адекватной модели управляемой системы. Для вычислений по этой модели было проведено компьютерное статистическое моделирование в пакете MatLab методом Монте-Карло.

Ключевые слова: модель управляемой системы, функция общественного благосостояния, значимые факторы, качество управленческих решений, матрица «предпочтений» эксперта, «пороговое» количество экспертов.

1. Введение

Сложившаяся в нашей стране система стратегического планирования и прогнозирования развития (страны в целом, регионов, отраслей) характеризуется низким качеством вырабатываемых управленческих решений, несмотря на то, что они формально обосновываются в ходе так называемых

¹ Ирина Евгеньевна Селезнева, аспирант, инженер
(ir.seleznewa2016@yandex.ru).

системных (стратегических и прогнозных) исследований [5], исполнители которых отбираются по итогам открытых конкурсов, проводимых государственным заказчиком. Причины таковы.

Во-первых, в данном случае использование конкурсных принципов отбора исполнителей таких НИР некорректно, так как объективные критерии такого выбора отсутствуют (подробнее см. [10, 11, 12, 13, 14]). До проведения исследований (а нередко и после) качество «продукта» еще не определено, а затраты на данные исследования не должны играть ведущей роли в выборе (подробнее о специфике прогнозных и стратегических НИР как вида деятельности см. [3]).

Во-вторых, выбирается единственный головной исполнитель системных исследований (конкретная организация). Но такой выбор фактически изначально предопределяет результат исследований. В составе любой конкретной выбранной организации-победителя заведомо не может быть представлена большая часть основных научных позиций и взглядов на изучаемую комплексную проблему (см. [15, 16]). Неизбежен субъективизм сотрудников головной организации, не уравновешенный критикой со стороны представителей других организаций, научных школ и т.п. Это препятствует выявлению новых факторов и связей, снижает качество разрабатываемых моделей социально-экономических систем, и, в конечном счете, лишает объективности прогнозы и стратегические решения.

В-третьих, отсутствует действенный контроль результатов выполнения НИР (по существу, но не по форме) даже со стороны заказчика. Поскольку заказчик выбрал именно данного исполнителя, фактически согласившись заранее с будущими результатами исследования, то эти результаты, безотносительно их качества, уже не могут быть подвергнуты критическому анализу, поскольку такая критика автоматически ставит под сомнение корректность выбора победителя конкурса.

Нередко некорректной оказывается и сама методология проведения системных исследований вследствие недостатков организации процесса. Несоответствие между располагаемыми компетенциями любого единственного исполнителя и

требуемыми (для полноценного исследования сложной крупномасштабной системы) компетенциями заставляет выбранных по конкурсу исполнителей прибегать к единственно возможной для них методологии — экспертному опросу широкого круга специалистов в различных релевантных областях, представителей сторонних организаций. Однако при этом, во-первых, неизбежен субъективизм в выборе экспертов и задаваемых им вопросов, в интерпретации получаемых ответов и в их обобщении. Здесь решающей фактически становится роль модератора экспертного опроса, которым и является головной исполнитель НИР. Во-вторых, путем экспертных опросов в принципе невозможно построить содержательную математическую модель крупномасштабной системы — иерархическую, сложно организованную. Как обосновано в работе [7], для разработки корректных и содержательных прогнозов и стратегий развития социально-экономических систем необходимо строить их экономико-математические модели. В свою очередь эти модели не должны ограничиваться только элементарными эконометрическими зависимостями, построенными по принципу «черного ящика». Для адекватного управления крупномасштабной системой следует придерживаться принципа «серого ящика», т.е. строить модели состава и структуры сложной системы, иначе говоря, взаимосвязи ее элементов, а также модели их поведения (см. [4, 9]). Следует строить *иерархическую систему* содержательных моделей изучаемой системы, подробнее см. [6].

Следовательно, необходимо изменение сложившейся организации системных исследований, повышение их эффективности и качества. Кроме того, сами понятия качества прогнозирования и стратегического планирования требуют объективного измерения и строгой формализации. В данной работе предлагаются экономико-математические модели оценки качества стратегий и прогнозов развития, а также организации их разработки.

2. Модели общественного благосостояния и групповых интересов

Пусть истинная функция полезности общества (отражающая в полной мере достижение декларируемых генеральных целей развития управляемой системы – отрасли, региона, национальной экономики) имеет вид $U(x)$, где $x \in [a; b]$ – управляющая переменная, подлежащая выбору (количественное выражение политики). Строго говоря, она является многомерным вектором, но для демонстрации предлагаемого подхода достаточно и одномерного скалярного примера. Предположим, что на интервале $[a; b]$ функция $U(x)$ достигает максимума $U_{max} = \max_{x \in [a; b]} U(x)$ в некоторой точке $x_{opt} \in [a; b]$. Она и представляет собой оптимальное решение для всего общества с точки зрения декларируемых целей, т.е. $U(x_{opt})$.

Предположим без ограничения общности, что функцию $U(x)$ можно представить в виде суммы слагаемых $\{u_k(x)\}$, $k = 1, \dots, m$, (назовем их *факторами*):

$$(1) \quad U(x) = \sum_{k=1}^m u_k(x).$$

Эти факторы отражают различные аспекты достижения генеральных целей развития и могут вести себя различным образом при изменении управляющей переменной x , т.е. могут быть противоречивыми, подробнее см.[8].

Предположим, что в обществе присутствует n различных групп, обладающих собственными интересами. Обозначим их индексами $i = 1, \dots, n$, причем интересы каждой группы отражает ее функция полезности $U^i(x)$. Пусть каждая такая функция также может быть представлена в виде суммы вышеописанных слагаемых $\{u_k(x)\}$, но для отдельных групп в составе суммы могут быть представлены не все возможные слагаемые, а только некоторые. Формально это можно выразить следующим образом:

$$(2) \quad U^i(x) = \sum_{k=1}^m \delta_k^i \cdot u_k(x),$$

где δ_k^i — индикатор, принимающий значение 1, если фактор k значим для группы i , и 0, если он для нее незначим. Разумеется, можно привести множество примеров, когда факторы, позитивные для одних групп, являются строго негативными (а не просто «незначимыми») для других, т.е. в обществе имеет место жесткий антагонизм. Однако здесь для простоты можно ограничиться описанным выше допущением.

Функции полезности каждой из n групп также достигают максимумов на интервале $[a;b]$ в некоторых точках $\{x_{opt}^i\}$, оптимальных для этих групп: $U_{max}^i = \max_{x \in [a,b]} U^i(x) = U^i(x_{opt}^i)$, $i = 1, \dots, n$. Разумеется, эти оптимальные точки могут отличаться от общественного оптимума x_{opt} . И если общественные решения будут приниматься, исходя из тех или иных групповых интересов, значение функции полезности общества будет отличаться от максимально возможного $U_{max} = U(x_{opt})$.

3. Формализация точности и качества системных исследований

Формально процесс разработки стратегий и прогнозов развития можно представить как формирование оценочной функции общественного благосостояния $\hat{U}(x)$, зависящей от тех или иных влияющих факторов. Эксперты, участвующие в системных (прогнозных, стратегических) исследованиях, представляют те или иные группы из числа n описанных выше групп общества. Соответственно, при формировании оценки функции полезности общества $\hat{U}(x)$ они сообщают о тех факторах, которые значимы для представляемой ими группы, которые для нее желательно учесть, и умалчивают о прочих, учет которых для данной группы невыгоден.

Будем считать, что если какие-либо эксперты, представляющие различные группы, сообщили о некотором факторе $\{u_k(x)\}$, $k = 1, \dots, m$, то этот фактор учтен в составе функции-оценки $\hat{U}(x)$. Данный фактор будет учтен один раз и

включен в состав функции-оценки $\hat{U}(x)$, как бы много таких экспертов ни было, – важно, чтобы данный фактор был учтен хотя бы одним из экспертов, допущенных к формированию оценочной функции полезности общества $\hat{U}(x)$. Для простоты не будем учитывать различие политического или научного «веса» тех или иных экспертов, способность более многочисленных коалиций экспертов нивелировать мнение менее многочисленных, а предположим, что для учета того или иного фактора важно, чтобы он был хотя бы раз упомянут в процессе построения системной модели функции-оценки $\hat{U}(x)$.

Отметим, что это – весьма оптимистическое представление о реальном процессе системных (прогнозных, стратегических) исследований. В реальной жизни исключительно важно обеспечить выполнение описанного принципа: если данный фактор был упомянут хотя бы однажды, его уже нельзя «замолчать», и если с научной точки зрения его значимость опровергнуть не удастся, он будет учтен при формировании политики. Поскольку в реальной жизни это нередко недостижимо, потери из-за неидеальности системных (прогнозных, стратегических) исследований, как правило, выше, чем будет показано в последующих рассуждениях.

Предположим, что политика, т.е. управляющие воздействия, формируются из соображений максимизации оценочной функции $\hat{U}(x)$. Она достигает максимума на интервале $[a;b]$ в некоторой точке $\hat{x}_{opt} \in [a;b]$, $\hat{U}(\hat{x}_{opt}) = \max_{x \in [a,b]} \hat{U}(x) = \hat{U}_{max}$.

Однако истинная функция полезности общества при такой политике может принимать значение, далекое от своего максимума: $U(\hat{x}_{opt}) \leq U(x_{opt}) = U_{max}$.

Таким образом, в конечном счете, качество организации системных (прогнозных, стратегических) исследований определяется тем, насколько близко значение истинной функции общественного благосостояния, достигаемое при политике, оптимальной по искаженному критерию, т.е. $U(\hat{x}_{opt})$, к максимуму истинной функции общественного благосостояния

$U_{max} = U(x_{opt})$. Степень отклонения от максимума общественного благосостояния нагляднее измерять в относительном выражении, т.е. как относительный проигрыш:

$$(3) \Delta = \frac{U_{max} - U(\hat{x}_{opt})}{U_{max}}.$$

4. Модель влияния организации стратегических исследований на качество управленческих решений

4.1. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В этом разделе рассматривается влияние количества экспертов, участвующих в формировании системной модели (общества, предприятия, национальной экономики в целом и т.д.) на полноту учета значимых факторов. Понятно, что если число учтенных в модели факторов практически равно общему числу всех факторов, влияющих на «выход» рассматриваемой системы, то такая модель адекватно описывает данную систему, а решения, получаемые на ее основе, являются точными. Однако реальная организация системных исследований нередко такова, что далеко не все заинтересованные группы и точки зрения будут представлены. Следовательно, необходимо проанализировать зависимость количества учтенных факторов от количества экспертов, формирующих модель управляемой системы. Для этих целей была предложена новая математическая модель процесса учета возможных значимых факторов. Модель определяет ожидаемое количество учтенных факторов из их общего числа в зависимости от количества экспертов, принимающих участие в опросе. Данная модель также позволяет оценить минимально допустимое количество экспертов, при котором в модели будут учтены практически все значимые факторы. При построении данной модели автор использует так называемое «мягкое» математическое моделирование (подробнее см. в книге [1]).

Предположим, что организация системных исследований приводит к тому, что в числе экспертов, допущенных к ним, оказываются представители $\hat{n} \leq n$ заинтересованных групп.

Реальный процесс формирования пула экспертов нередко является отнюдь не случайным, а представляет собой коалиционную игру, в ходе которой различные группы блокируются для лоббирования желательного для них состава учтенных факторов. Но здесь для простоты предположим, что при заданной организации исследований случайным образом выбираются эксперты, представляющие $\hat{n} \leq n$ групп, и сообщают о факторах, значимых с их точки зрения. Предположим, что каждая группа считает для себя значимыми

в среднем $\bar{m}_{гp}$ факторов, т.е. $M \left[\sum_{k=1}^m \delta_k^i \right] = \bar{m}_{гp}$, где $M[\dots]$ –

символ математического ожидания. Причем, в отличие от реальной ситуации возможной пристрастности экспертов, будем считать, что факторы, учитываемые каждой из групп, распределены равномерно среди всех m факторов. Таким образом, получаемые оценки будут оптимистическими, и если даже по этим оценкам текущая организация системных исследований не обеспечивает полноту учета значимых факторов, значит, в реальности обоснование стратегических решений заведомо не может быть объективным. Обозначим \hat{m} – ожидаемое число учтенных в модели факторов при данной организации системных исследований. Способы аналитического определения этой величины в рамках вышеописанной схемы автору неизвестны, поэтому пришлось прибегнуть к численному решению путем компьютерного статистического моделирования в пакете MatLab методом Монте-Карло (подробнее см. [2,17]).

Алгоритм расчетов по предлагаемой модели следующий: факторы, выбираемые экспертами, ставятся в зависимость от значений случайной величины a , равномерно распределённой на отрезке $[0, 1]$. На первом шаге отрезок $[0, 1]$ поделен на m равных частей. То есть количество полученных отрезков равно числу всех значимых факторов, из которых выбирают эксперты. Если значение случайной величины попало в промежуток $\{(i-1)/m, i/m\}$, то фактор, названный экспертом, равен i . На втором шаге отрезок $[0, 1]$ делится на $(m-1)$ равные части, поскольку «свободных» неназванных факторов осталось ровно $(m-1)$. Если значение случайной величины попало в

промежуток $\{(i-1)/(m-1), i/(m-1)\}$, то фактор, названный экспертом равен i -му «свободному» (т.е. ранее не названному) фактору и т.д. Количество таких шагов, выборов, равно числу факторов, выбираемых отдельным экспертом, т.е. $\bar{m}_{\text{гр}}$. На рис. 1 представлен последовательный ход рассуждений при расчете по модели процесса организации системных исследований.

В ходе таких вычислений программа выдает матрицу – строку A_n , состоящую из m элементов, заполненную числами 0 и 1. Номера ячеек, со значениями равными 1 – это те факторы, которые были названы экспертом. Тогда A_n – матрица «предпочтений» n -го эксперта. Если $A_n[k] = 0$, то k -й фактор не был назван n -м экспертом. Если же, наоборот, $A_n[k] = 1$, то это означает, что k -й фактор был назван n -м экспертом.

Для каждого эксперта программа вычисляет соответствующую матрицу «предпочтений» A_n . Число таких матриц равно числу экспертов, участвующих в опросе. Если сложить полученные матрицы, получим матрицу $A = \sum_{i=0}^n A_i$.

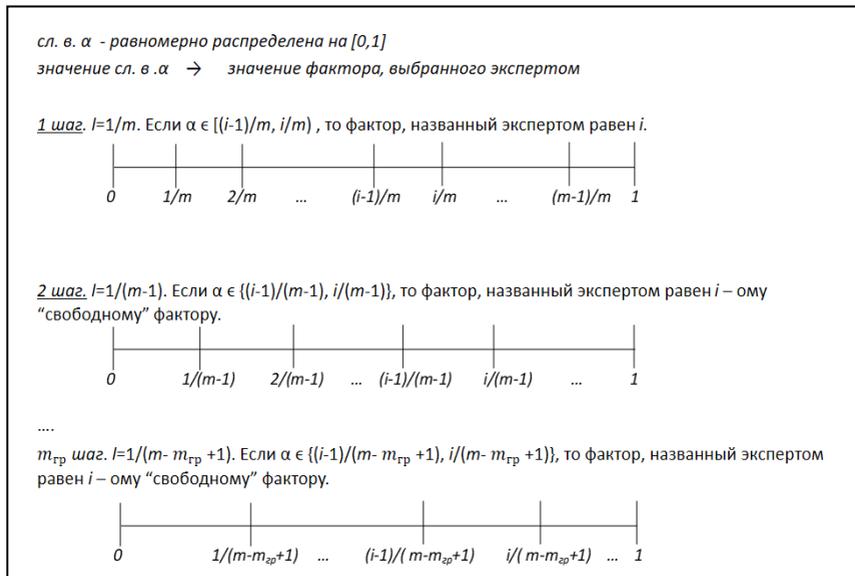


Рис. 1. Алгоритм статистического моделирования процесса выбора экспертами значимых факторов

Если $A[k] = 0$, то k -й фактор вообще не учтен в системной модели. Если же $A[k] \neq 0$, то k -й фактор учтен в модели. То есть номера ячеек, значения которых равно нулю, являются неучтенными в модели факторами, а номера ячеек, значения которых отличны от нуля, являются учтенными факторами. И, следовательно, число учтенных факторов – это общее число всех значимых факторов минус число неучтенных в модели факторов.

4.2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО МОДЕЛИ

После задания исходных данных (количества всех значимых факторов m и числа факторов, выбираемых в среднем отдельным экспертом $\bar{m}_{\text{тр}}$), описанная программа вычисляет число учтенных факторов в зависимости от количества экспертов, допущенных к формированию модели. На рис. 2 и рис. 3 представлены зависимости ожидаемого числа учтенных факторов модели от числа экспертов, принимающих участие в опросе для двух расчетных случаев.

Пример 1: $m = 10$, $\bar{m}_{\text{тр}} = 2$.

Пример 2: $m = 10$, $\bar{m}_{\text{тр}} = 7$.

В таблицах 1 и 2 указаны расчетные данные для данных вычислительных экспериментов. Число симуляций в процессе статистического моделирования выбрано равным 100.

Как видно из примера 1, для адекватного описания управляемой системы в формировании оценочной функции общественного благосостояния должно принять участие как минимум 9 экспертов. В этом случае ожидаемое число учтенных факторов составит 9 из 10, что отвечает высокому качеству системной модели и принимаемых на ее основе управленческих решений. Другими словами, пороговое значение числа экспертов N , участвующих в опросе, равно 9.

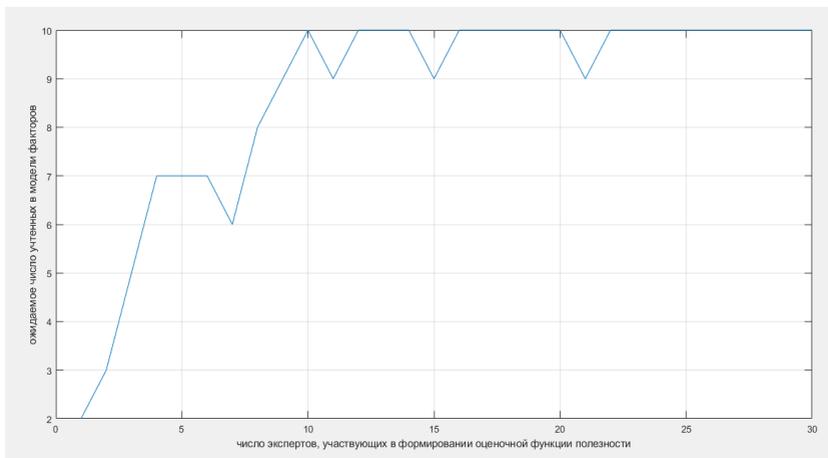


Рис. 2. Зависимость ожидаемого количества учебных факторов от числа экспертов, допущенных к формированию системной модели (пример 1)

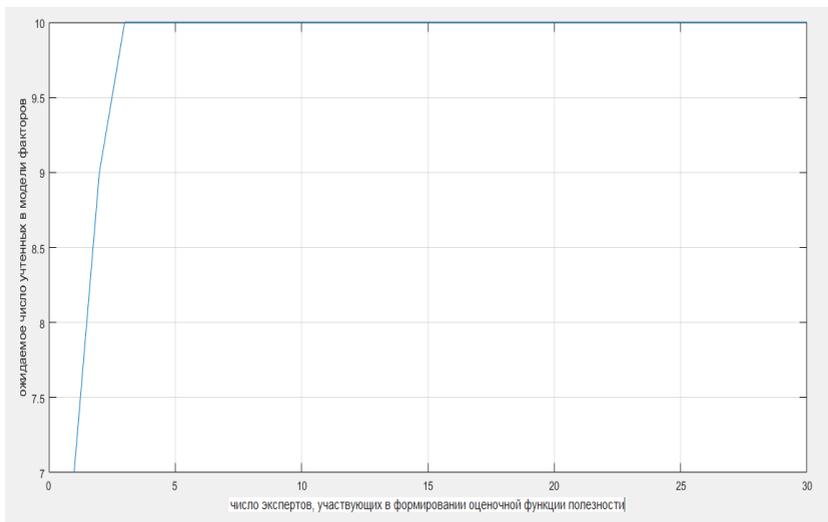


Рис. 3. Зависимость ожидаемого количества учебных факторов от числа экспертов, допущенных к формированию системной модели (пример 2)

Таблица 1. Расчетные данные по модели (пример 1)

Число экспертов, формирующих оценочную функцию полезности	Число учтенных в модели факторов
1	2
2	3
3	5
4	7
5	7
6	7
7	6
8	8
9	9
10	10
11	9
12	10
13	10
14	10
15	9
16	10
17	10
18	10
19	10
20	10
21	9
22	10
23	10
24	10
25	10
26	10
27	10
28	10
29	10
30	10

Таблица 2. Расчетные данные по модели (пример 2)

Число экспертов, формирующих оценочную функцию полезности	Число учтенных в модели факторов
1	7
2	9
3	10
4	10
5	10
6	10
7	10
8	10
9	10
10	10
11	10
12	10
13	10
14	10
15	10
16	10
17	10
18	10
19	10
20	10
21	10
22	10
23	10
24	10
25	10
26	10
27	10
28	10
29	10
30	10

Во втором примере, когда число факторов, выбираемых отдельным экспертом, практически совпадает с общим числом всех значимых факторов, для построения адекватной модели необходимо по крайней мере 2 эксперта. В этом случае ожидаемое число учтенных факторов составит также 9 из 10, что отвечает высокому качеству системной модели и принимаемых на ее основе управленческих решений. То есть пороговое значение числа экспертов, формирующих оценочную функцию, значительно уменьшилось и составило 2 единицы.

Таким образом, исходя из анализа полученных графиков, получим, что при $\bar{m}_{\text{тр}} \approx m$, даже если в числе экспертов будут представлены немногие группы общества (т.е. при $\hat{n} \ll n$), вероятно, будут учтены почти все факторы, т.е. $\hat{m} \approx m$. Такое положение соответствует относительно полному учету интересов общества в целом со стороны каждой из заинтересованных групп, т.е. относительно консенсусу в обществе в целом и в сообществе экспертов относительно общественного благосостояния и критериев достижения декларируемых генеральных целей развития. В этом случае не столь важно широкое представительство различных заинтересованных групп при разработке стратегий и прогнозов. То есть при увеличении значения $\bar{m}_{\text{тр}}$ снижается допустимое пороговое значения числа экспертов, необходимое для формирования адекватной модели.

При $\bar{m}_{\text{тр}} \ll m$ и $\sum_{k=1}^m (\delta_k^i \cdot \delta_k^j) \ll m$, что отражает высокую степень поляризации интересов и даже антагонизм между группами общества, неполное представительство этих групп в пуле экспертов чревато тем, что при формировании функции-оценки общественного благосостояния значительная доля значимых факторов учтена не будет. То есть если значение числа факторов, в среднем выбираемое отдельной группой экспертов, много меньше общего числа всех значимых факторов, то для формирования адекватной модели управляемой системы пороговое число экспертов, участвующих

в формировании оценочной функции общественного благосостояния, должно быть достаточно высоким.

4. Условия «робастности» рассматриваемой системы к искажениям целевой функции и оптимальной политики

Неполный учет различных факторов при проведении системных (прогнозных, стратегических) исследований приводит к следующей цепочке последствий:

- искаженным оценкам последствий различных решений;
- неоптимальному формированию политики;
- потерям общественного благосостояния.

Однако в некоторых случаях, даже если число учтенных в модели факторов намного меньше общего числа всех значимых факторов, это может не привести к сильным потерям общественного благосостояния. Опишем условия такой «робастности».

Например, даже при сильном отличии оценочной функции полезности общества от истинной, вполне возможно, что точки оптимума \hat{x}_{opt} и x_{opt} будут отличаться относительно мало. Это имеет место в следующих случаях.

Либо практически все значимые факторы не конфликтны, а сонаправлены и достигают максимума приблизительно в одной точке – см. пример 1 на рис. 4.

Либо они имеют различные точки максимума на интервале $[a; b]$: например, половина ближе к его левой границе a , а половина – к правой границе b , и лишь их сумма достигает максимума в некоторой точке x_{opt} . Но при этом возможно, что в числе немногих факторов, учтенных при формировании функции $\hat{U}(x)$, оказались все разнонаправленные типы факторов, так что максимум суммы этих слагаемых близок к максимуму полной суммы всех факторов $U(x)$, как показано на рис. 5.

В противном же случае при таком разнородном составе целевой функции оценка оптимума будет сильно искажена.

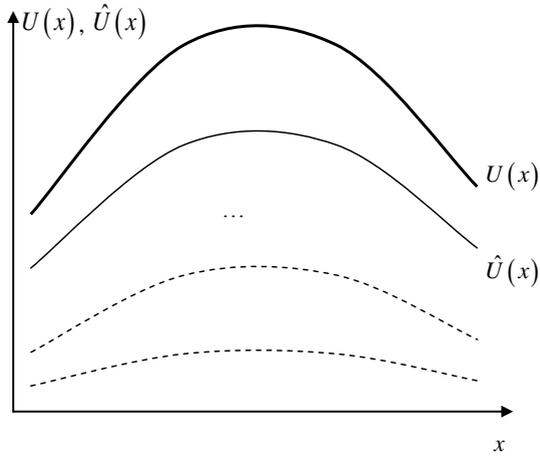


Рис. 4. Оценка оптимума при неполном учете значимых факторов в составе целевой функции (пример 1)

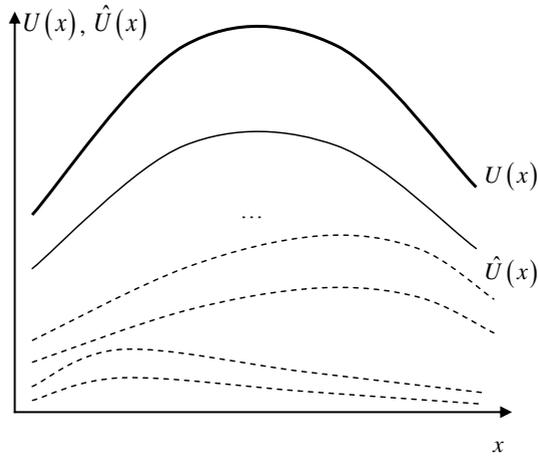


Рис. 5. Оценка оптимума при неполном учете значимых факторов в составе целевой функции (пример 2)

Наконец, возможно, что даже при сильном отличии истинной оптимальной политики x_{opt} от квазиоптимальной \hat{x}_{opt} , полученной на основе искаженной функции полезности

общества $\hat{U}(x)$, значение истинной функции общественного благосостояния сократится незначительно. Это имеет место в следующих случаях:

– при слабой зависимости функции общественного благосостояния от выбранной политики на интервале $[a;b]$, т.е. в случае, когда $\max_{x \in [a;b]} U(x) - \min_{x \in [a;b]} U(x) \ll \max_{x \in [a;b]} U(x)$ – см. пример на рис. 6;

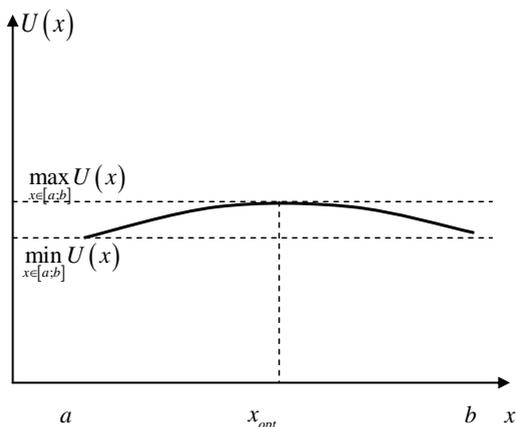


Рис. 6. Изменение значения целевой функции при отклонении от максимума (пример 1)

– истинная функция полезности общества на интервале $[a;b]$ меняется немонотонным образом (например, периодически), и в некоторой точке \hat{x}_{opt} , сильно отличающейся от истинного оптимума x_{opt} , тем не менее, достигает значения, лишь немногим меньшего, чем максимум на данном интервале U_{max} , что показано на рис. 7.

В реальности весьма маловероятно, хотя и возможно, что неоптимальная политика \hat{x}_{opt} практически совпадет с другим локальным максимумом функции $U(x)$, как на рис. 7.

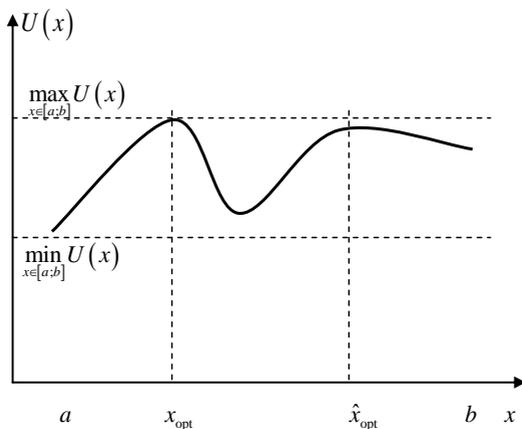


Рис. 7. Изменение значения целевой функции при отклонении от максимума (пример 2)

При выполнении вышеописанных условий устойчивости, «робастности» рассматриваемой системы к искажениям целевой функции и оптимальной политики (что показано на рис. 4, 5, 6 и 7) даже крайне несовершенная организация системных исследований не приведет к критическим последствиям и большим потерям общественного благосостояния. Напротив, в противоположных случаях система управления развитием (предприятия, отрасли, региона, национальной экономики в целом) весьма чувствительна к недостаткам организации и методологии стратегического анализа, прогнозирования и планирования. Именно в этих случаях наиболее актуальными становятся вышеприведенные меры повышения качества системных исследований.

5. Заключение

По итогам количественного анализа предложенной экономико-математической модели организации процесса системных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для формирования адекватной модели управляемой сложной системы минимально допустимое, «пороговое» число

экспертов N зависит от количества факторов, в среднем выбираемого отдельным экспертом $\bar{m}_{\text{тр}}$. При увеличении $\bar{m}_{\text{тр}}$ допустимое «пороговое» число экспертов N снижается. Для двух рассмотренных случаев при $\bar{m}_{\text{тр}} = 2$ $N = 9$, а при $\bar{m}_{\text{тр}} = 7$ $N = 2$.

То есть число экспертов, научных школ или, другими словами, количество альтернативных точек зрения, привлекаемое к стратегическим исследованиям, зависит от числа факторов, учитываемых отдельной научной школой $\bar{m}_{\text{тр}}$ следующим образом:

- если каждая школа учитывает лишь несколько важных факторов из их большого числа, т.е. мнения откровенно поляризованы и политизированы, тогда обязательно привлекать многих;

- если же каждая школа учитывает почти все, т.е. в обществе почти консенсус, тогда можно обойтись и небольшим представительством альтернативных точек зрения.

2. Повышение качества организации разработки стратегий и прогнозов, направленное на максимально полный учет всех значимых факторов при построении системных моделей, наиболее актуально в тех случаях, когда:

- мнения общества сильно поляризованы относительно значимости тех или иных факторов для достижения генеральных целей развития;

- различные факторы, влияющие на достижение генеральных целей развития, конфликтуют между собой и по-разному зависят от выбранной политики;

- степень достижения генеральных целей развития сильно зависит от выбранной политики и существенно уменьшится / снизится при неоптимальном ее характере.

Напротив, при выполнении условий «робастности» управляемой системы, предлагаемые меры повышения качества системных исследований неактуальны, поскольку даже крайне несовершенная организация системных исследований не приведет к критическим последствиям и большим потерям общественного благосостояния.

Литература

1. АРНОЛЬД В.И. *«Жесткие» и «мягкие» математические модели.* – М.: Московский центр непрерывного математического образования (МЦНМО), 2004. – 32 с.
2. БУСЛЕНКО Н.П., ГОЛЕНКО Д., СОБОЛЬ И.М., СРАГОВИЧ В.Г., ШРЕЙДЕР Ю.А. *Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло).* – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 1962. – 332 с.
3. ГОЛЬДШТЕЙН Г.Я. *Стратегический инновационный менеджмент: учебное пособие.* – Таганрог: Таганрогский государственный радиотехнический университет (ТРТУ), 2004. – 267 с.
4. ВОСТРИКОВА Е.О., МЕШКОВА А.П. *Благосостояние: способы измерения // Актуальные вопросы экономических наук.* – 2009. – №5-1. – С. 69–74.
5. КЛОЧКОВ В.В., СЕЛЕЗНЕВА И.Е. *Проблемы методологии и организации исследований и разработок, выполняемых в интересах государственного управления // Россия: тенденции и перспективы развития.* – 2016. – Вып.11, Часть 2. – С. 401 – 407.
6. КЛОЧКОВ В.В., СЕЛЕЗНЕВА И.Е. *Новые принципы организации прогнозных и стратегических исследований и разработок // Друкерровский вестник.* – 2016. – №4. – С. 98–112.
7. КЛОЧКОВ В.В., СЕЛЕЗНЕВА И.Е. *Стратегические и прогнозные исследования и разработки: проблемы методологии и организации // Национальные интересы: приоритеты и безопасность.* – 2017. – Т. 13, Вып. 3. – С. 449–463.
8. КЛОЧКОВ В.В., СЕЛЕЗНЕВА И.Е. *Модель оценки качества стратегий и прогнозов развития социально-экономических систем // Экономическая наука современной России.* – 2017. – №4(79). – С. 7–18.

9. НУРЕЕВ Р.М. *Теория общественного выбора*. – М.: Высшая школа экономики, 2005. – 478 с.
10. РАЙЗБЕРГ Б.А. *Стратегическое планирование - главная форма целенаправленного преобразования социально-экономической системы в долгосрочной перспективе // Стратегическое планирование, проблемы и перспективы реализации в системе государственного управления российской экономикой: [сборник научных статей]*. – М.: Экономика, 2012. – С. 48–58.
11. РАЙЗБЕРГ Б.А. *Целевые комплексные программы. Их место и роль в системе стратегического планирования государственного управления // Стратегическое планирование, проблемы и перспективы реализации в системе государственного управления российской экономикой: [сборник научных статей]*. – М.: Экономика, 2012. – С. 70–93.
12. СОСКОВ В.Ф., РАЙЗБЕРГ Б.А. *Противоречия и логические тупики в системе государственного управления экономикой // Стратегическое планирование, проблемы и перспективы реализации в системе государственного управления российской экономикой: [сборник научных статей]*. – М.: Экономика, 2012. – С. 35–47.
13. СОСКОВ В.Ф., РАЙЗБЕРГ Б.А. *Опыт перспективного стратегического планирования в советский период российской истории // Стратегическое планирование, проблемы и перспективы реализации в системе государственного управления российской экономикой: [сборник научных статей]*. – М.: Экономика, 2012. – С. 256–274.
14. СОСКОВ В.Ф., РАЙЗБЕРГ Б.А. *Принципы формирования системы целевой ориентации развития экономики российской федерации // Стратегическое планирование, проблемы и перспективы реализации в системе государственного управления российской экономикой: [сборник научных статей]*. – М.: Экономика, 2012. – С. 59–69.

15. СОСКОВ В.Ф., РАЙЗБЕРГ Б.А., ИВАНОВА Д.А. *Неотъемлемые элементы системы стратегического планирования и управления российской экономикой // Стратегическое планирование, проблемы и перспективы реализации в системе государственного управления российской экономикой: [сборник научных статей]. – М.: Экономика, 2012. – С. 200–211.*
16. ТРЕНЕВ Н.Н. *Стратегическое управление.* – М.: Приор, 2000. – 288с.
17. ШВЕДОВ А.С. *О методах Монте-Карло с цепями Маркова // Экономический журнал Высшей школы экономики.* – 2010 – Т. 14, №2. – С. 227–243.

ECONOMY-MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM RESEARCHES PROCESS ORGANIZATION

Irina Selezneva, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, postgraduate (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, (495) 334-93-09, ir.seleznewa2016@yandex.ru).

Abstract: The paper considers the problem of improving the quality of state strategic planning and forecasting. It is assumed that the model of the controlled system is built for the development of management decisions in the course of the so-called system studies. Mathematical models of this process, models of strategic decision-making and their impact on social welfare are developed in order to analyze the impact of the organization of the system research process on the quality of the resulting model and on the quality of strategic management decisions. The process of formation of the estimated society utility function is described. The accuracy and quality of management decisions are formalized. The conditions of "robustness" of the managed system to distortions of the target function of society and optimal policy are described. The expected number of factors taken into account from the total number of potentially significant factors depending on the number of experts participating in the system research is determined. This makes it possible to estimate the minimum allowed "threshold" number of experts required to build an adequate model of the controlled system. Computer statistical modeling in MatLab package by Monte Carlo method was carried out for calculations on this model.

Keywords: a model of a managed system, the function of social welfare, significant factors, the quality of management decisions, the matrix of "preferences" of the expert, the "threshold" number of experts.

УДК 338.2

ББК 65.054

DOI: 10.25728/ubs.2018.76.4

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Г.А. Угольником.*

Поступила в редакцию 04.04.2018.

Опубликована 30.11.2018.

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМИ ЦИКЛАМИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Белов М. В.¹

(Компания ИБС, Москва)

Общие проблемы управления организационно-техническими системами (ОТС) проанализированы в контексте согласования взаимосвязанных жизненных циклов соответствующих структурных элементов деятельности. Сформулирована система тезисов, фиксирующих связи комплексной деятельности и ОТС, особенности ОТС как предмета управления. Определены средства решения проблемы, которыми являются компоненты управления: синтез и конкретизация. Выявлено, что проблема управления ОТС должна решаться с учётом необходимости устранения измеримой неопределённости - включением в рассмотрение сценариев реакции на измеримую неопределённость, а также допускать возможность многократного последовательного решения из-за наступления событий истинной неопределённости в течение жизненных циклов элементов комплексной деятельности. Показано, что проблема управления ОТС решается, вообще говоря, на всех фазах и этапах жизненных циклов их деятельности. Решающее влияние на результативность и эффективность комплексной деятельности оказывает создание компонентов технологии (в том числе и компонентов управления) в виде информационных моделей на этапе синтеза. Определён итоговый перечень базовых задач управления ОТС.

Ключевые слова: управление организационно-техническими системами, комплексная деятельность, жизненные циклы, технология.

1. Введение

Практически вся человеческая деятельность (целенаправленная активность) реализуется в рамках организаций различных форм - предприятий, фирм, проектов, проектных программ, государственных, региональных и муниципальных агентств и образований, транснациональных корпораций и их подразделений, а также различных объединений и композиции всех вышеперечисленных комплексных субъектов деятельности вместе со связанными с ними всевозможными информационными и техническими объектами, системами, устройствами. Целенаправ-

¹ Михаил Валентинович Белов, к.т.н. (mbelov59@mail.ru).

ленность субъектов деятельности, (очевидно, что существование любого субъекта без цели не имеет смысла) делает актуальной проблему организации и управления как отдельными субъектами, так и их совокупностями.

В разделе 2 введено понятие организационно-технической системы (ОТС), объединяющей комплексные субъекты деятельности, и показано, что, решая задачу организации и управления ОТС, необходимо в первую очередь рассматривать осуществляемую ими комплексную деятельность (КД), которая исследована в методологии комплексной деятельности (МКД) [1].

Анализ особенностей ОТС как предмета управления выполнен в разделе 3. На его основе проблема управления ОТС сведена к проблеме согласованного управления совокупностью взаимосвязанных жизненных циклов (ЖЦ) элементов комплексной деятельности.

Средствами решения проблемы управления в разделе 4 определены такие компоненты управления как синтез и конкретизация.

В разделе 5 выполнена формализация проблемы управления ЖЦ ОТС в виде системы моделей, включающей модели технологической функции, функции согласования интересов субъектов, функции календарно-сетевого планирования и назначения ресурсов, функции эволюции пулов ресурсов.

Задачи согласованного управления ЖЦ ОТС сформулированы в разделе 6.

В заключении рассмотрены связи рассматриваемой проблематики со смежными областями науки, выявлены известные результаты, применимые для решения проблемы согласованного управления ЖЦ ОТС и определены факторы её новизны.

2. Организационно-технические системы и комплексная деятельность

Проанализируем комплексные субъекты человеческой деятельности, обобщим и выделим их общесистемные особенности, на основании чего сформулируем перечень моделей и методов, необходимых для обоснованного управления ими.

Все комплексные субъекты деятельности объединяют несколько оснований: во-первых, они являются *сложными системами*¹, во-вторых, включают в качестве элементов *людей*, в-третьих, существенная доля их составных частей является *искусственной*, т.е. созданной человеком.

Объединяя эти субъекты по перечисленным основаниям, отнесем их к *организационно-техническим системам*, определяя ОТС² как сложную систему, включающую людей и, быть может, технические и природные элементы.

Категорию *управления* будем понимать как воздействие субъекта управления на управляемую систему - объект управления, призванное обеспечить ее (его) поведение³, приводящее к достижению *целей*⁴ субъекта управления [1].

Данное определение, во-первых, явно «отделяет» субъект от управляемого объекта, во-вторых, допускает несоответствие целей управляющего субъекта и целей управляемого объекта (ОТС в целом или её элементов - подсистем и/или входящих в

¹ *Система* – «совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которая образует определенную целостность, единство» [18, С. 610]. «*Система* (искусственная) - совокупность взаимодействующих элементов, организованная для достижения одной или нескольких декларированных целей. ... Система (в прикладном смысле) часто рассматривается как продукт (деятельности) или как сервис, который система обеспечивает» [27, С. 9]. *Сложная система (Complex System)* – открытая система с постоянно взаимодействующими и конкурирующими элементами. Постоянная эволюция и изменения элементов происходят благодаря их внутренним условиям и влиянию внешней среды. Поведение системы и связи между элементами трудны для описания, понимания, прогнозирования и управления. Открытость понимается как свободное и неограниченное искусственными факторами участие и взаимодействие элементов друг с другом и окружающей средой [32].

² *Определение ОТС* соответствует достаточно распространенному в англоязычной литературе термину *Enterprise System* [30]. Данное определение расширяет определения технических, организационных [13], эргатических и социотехнических [21] систем.

³ *Поведение* - последовательное (во времени), хотя бы частично наблюдаемое, поддающееся измерению, объективной фиксации изменение его состояний.

⁴ *Цель* [10] — идеальный или реальный предмет сознательного или бессознательного стремления субъекта; конечный результат, на который преднамеренно направлен процесс; предвосхищаемый/желательный результат деятельности.

ОТС индивидов), в-третьих, декларирует обязательность изменения состояний управляемого объекта во времени (сохранение состояния является частным случаем динамики). Также определение неявно фиксирует два возможных способа достижения цели субъектом:

- непосредственно - выполнением самим субъектом действий, направленных на достижение цели;
- опосредованно - воздействием на некоторый управляемый объект или систему таким образом, чтобы в результате поведения объекта или системы была достигнута исходная цель.

Источник целеполагания позволяет разделить все ОТС на два класса (или группы):

I. ОТС с заданными извне целями;

II. ОТС, формирующие цели самостоятельно.

К первому классу (группе) относятся фирмы, организации, предприятия, государственные и муниципальные агентства и органы, проектные группы и аналогичные комплексные субъекты деятельности, создаваемые и функционирующие в интересах внешних по отношению к ним заинтересованных лиц (акционеров, правительств, муниципалитетов и т.д.).

Второй класс (группа) включает, прежде всего, людей как индивидов, жизнь которых является для них самоценной и потому является их конечной и внутренне порождённой целью. Также «внутренними» целями руководствуются такие субъекты как семья, племя, этнос, государство. Отличительной чертой ОТС из класса II является возможность самостоятельного активного выбора (в том числе группового) целей; подчёркивая это свойство, будем условно называть ОТС класса II «*активными ОТС*».

Отметим, что среди элементов любой ОТС класса I всегда найдутся такие, роль которых играют ОТС класса II. По крайней мере, согласно данному выше определению ОТС в её состав обязаны входить люди, которые являются частным случаем ОТС класса II. Когда ОТС класса II выступает в роли элемента ОТС класса I, возникает проблема согласования «внутренних» целей, присущих ОТС класса II, с «внешними» целями, которые ей следует достичь в роли элемента ОТС класса I. Проблема

согласования «внешних» и «внутренних» целей субъекта должна решаться на основе анализа источников или причин целеполагания, каковыми являются интересы или предпочтения субъекта.

Опираясь на определения, данные в [14, 15]¹, будем понимать «интересы» субъекта КД как причину будущих действий, потребность в некотором результате (для достижения которого необходимы действия), соответственно которым субъект ставит цель. Тогда анализируемая проблема согласования целей сводится к задаче *согласования интересов* субъектов².

Эта задача в той или иной степени изучается такими разделами науки как теория принятия решений, теория игр, теория активных систем, теория управления организационными системами, теория контрактов (см. обзор соответствующих разделов знаний в [13]), и рассматривается в качестве одной из задач управления ОТС ниже.

Организационно-технические системы именно класса I представляют практический интерес как объекты управления, в то время как управление индивидом (не сотрудником фирмы, а именно индивидом как таковым) или семьёй лежит вне предмета рассмотрения настоящей работы. Кроме того, применение вышеприведённого определения управления к ОТС класса II наталкивается на методическую сложность отделения субъекта

¹ *Интерес [15] (от лат. interest - имеет значение, важно), в социологии - реальная причина социальных действий, лежащая в основе непосредственных побуждений - мотивов, идей и т. п. - участвующих в них индивидов, социальных групп. Содержание и характер интереса связаны как со строением и динамикой мотивов и потребностей человека, так и с характером форм и средств освоения действительности, которыми он владеет. Интерес [14] - нужды, потребности.*

² *Проиллюстрируем проблему согласования целей и интересов на примере двух субъектов, условно назовём их «А» и «Б», которые выполняют роли некоторых элементов ОТС «В» класса I. Пусть в рамках своей роли в ОТС «В» субъект «Б» формирует цель для роли, выполняемой субъектом «А». Эта цель является «внешней» для субъекта «А», который, будучи частным случаем ОТС класса II, всегда имеет «свои внутренние» цели. Тогда для согласования «внешних» и «внутренних» целей субъекта «А» необходимо согласование интересов субъекта «А» с интересами субъекта «Б».*

управления от объекта. Поэтому в настоящей работе, если не оговорено особо, ограничимся рассмотрением ОТС первой группы, однако будем учитывать, что роли части элементов ОТС всегда играют активные ОТС второй группы. То есть в дальнейшем рассматриваем ОТС, формируемые или существующие для достижения целей или создания выгод в интересах внешних по отношению к ним заинтересованных лиц.

Говоря об управлении ОТС, необходимо «находиться вне» ОТС, отделяя субъект управления от объекта - ОТС. Если мы хотим управлять ОТС - воздействовать на ее поведение (последовательность состояний) для достижения своей цели, то мы обязаны исследовать, как происходит смена состояний ОТС, как за счёт этого достигаются конечные (итоговые) цели.

Анализируя общественно-историческую практику, мы видим, что именно деятельность, выполняемая ОТС, формирует результат, который представляет ценность/полезность для заинтересованных лиц. ОТС, как комплексные субъекты деятельности, не обеспечивают достижение целей и получение выгод только одним своим существованием. Непосредственно существование субъектов требует лишь затрат ресурсов, в то время как цели достигаются, а выгоды создаются в результате *деятельности*, которую субъекты реализуют в течение своих жизненных циклов. То есть субъекты, выполняющие те или иные роли в ОТС, являются лишь вынужденным (требующим затрат) обеспечивающим средством для реализации ими деятельности, достигающей конечные цели и формирующей целевые выгоды (см. рис. 1).

То есть цель ОТС реализуется через цель деятельности, выполняемой этой ОТС.

Определённый дуализм пары «деятельность–ОТС» позволяет также занять иную позицию, адекватную ОТС второй группы. А именно, подобная ОТС является самодостаточным целеполагающим субъектом деятельности и реализует некоторым образом деятельность, достигая конечный результат. Однако, не исследуя, как реализуется деятельность и как достигается результат, мы не можем обосновано воздействовать на поведение ОТС, т.е. не можем управлять последней.

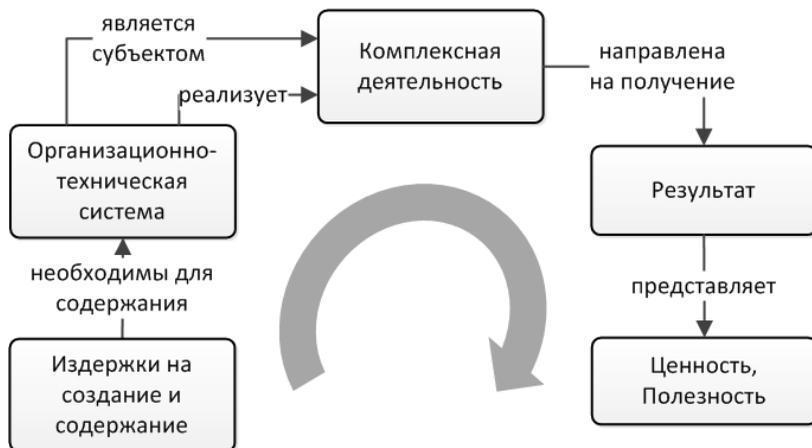


Рис. 1. ОТС и комплексная деятельность в цепочке создания ценности

Следовательно, решая задачу организации и управления ОТС - субъектами человеческой деятельности (элементы субъектов и совокупности субъектов в общем случае также являются такими субъектами), необходимо рассматривать осуществляемую ими деятельность.

Тезис о приоритетности рассмотрения деятельности согласуется с рекомендациями общепринятых международных стандартов серии ISO9000 систем качества: для достижения устойчивого успеха организаций использовать «процессный подход», фокусируясь на деятельности, осуществляемой организацией [9].

«Процесс», будучи основным понятием целой серии стандартов, определяется в [8] как «совокупность взаимосвязанных и (или) взаимодействующих видов деятельности, использующих входы для получения намеченного результата». То есть «процессный подход» фактически означает рассмотрение деятельности, её регламентацию и оптимизацию. Однако «процессный подход» не решает проблем организации и управления деятельностью, а также не учитывает ряд существенных аспектов деятельности. Именно эти вопросы поставлены в центр внимания

методологии комплексной деятельности (в таблице 1 сопоставляются результаты процессного подхода и МКД).

В МКД [1] ведено понятие комплексной деятельности и исследована природа КД как сложной системы. *Комплексная деятельность* определена как деятельность, обладающая нетривиальной внутренней структурой, с множественными и/или изменяющимися субъектом, технологией, ролью предмета деятельности в его целевом контексте. В методологии КД выявлены и исследованы общесистемные (характерные для любых отраслей человеческой деятельности) закономерности строения и развития КД во времени: ее структура, неопределённость, жизненный цикл. Закономерности сформулированы в виде совокупности утверждений и описаны системой формальных моделей [1].

Предметом методологии КД является диалектически взаимодействующая пара «комплексная деятельность vs ОТС», при этом ОТС по отношению к КД может играть роли и субъекта, и средства, и объекта; методология КД разработана для случая, когда организационно-техническая система и КД, образующие пару, имеют самый общий вид [1]. Поэтому будем использовать в данной работе результаты, модели и подходы МКД [1] для концептуализации проблемы управления ОТС.

Примечание к таблице 1. Неопределённость в [1] вводится как возможность наступления в ходе КД таких событий, влияющих на реализацию КД и на ее результат, которые могут наступить, а могут и не наступить. Следствием неопределённости КД является невозможность априори предсказать характеристики результата деятельности, момент его получения и усилия (ресурсы), которые будут для этого затрачены.

Следуя идеям F. Knight [28], в МКД разделяются измеримая и истинная неопределённость. Измеримая неопределённость КД - возможность наступления описываемых некоторыми закономерностями событий. Для анализа таких событий могут быть использованы количественные методы (например, вероятностные/статистические), основанные на предыдущих измерениях или фундаментальных законах (вместе с предположением о неизменности условий и закономерностей). Истинная неопределённость КД - возможность наступления уникальных (или редко повторяющихся) событий, которые не объясняются известными закономерностями. В управлении проектами истинную неопределённость иногда называют непредвиденными рисками.

Таблица 1. Сравнение методологии комплексной деятельности и процессного подхода ISO9000

Основание сравнения	МКД	Процессный подход систем менеджмента качества, ISO9000
Системный подход	Является основным, КД рассматривается как система, предмет МКД – пара <КД vs ОТС>	Продекларирован в качестве одного из восьми основных принципов.
Основной элемент моделирования	Структурный элемент деятельности (СЭД), включает КД, субъект и предмет	Процесс - совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности, преобразующих входы в выходы.
Модели	Логическая, причинно-следственная, процессная (ЖЦ СЭДа)	Различные формализмы, описывающие в том числе целевую структуру, причинно-следственную, оргструктуры и т.д. Модели ЖЦ процесса в явном виде отсутствуют.
Неопределённость	Является одним из основных рассматриваемых аспектов КД	Не рассматривается вовсе. Даже не упоминается в стандартах.
Жизненный цикл	Является одним из основных рассматриваемых аспектов КД	Жизненный цикл процессов не рассматривается. Много говорится о «непрерывных улучшениях», но процессы создания процессов не анализируются.
Технологии	Исследована роль технологии, разработаны модели создания технологий КД, показано, что технологии определяют эффективность и результативность КД.	Роль технологии выполнения процессов не исследуется.
Управление и организация как деятельность	Исследование управления и организации является ключевым в МКД: представлены компоненты организации и управления, а также «универсальный алгоритм управления»; показано, что КД состоит из специфических элементарных операций и организационных и управляющих структурных элементов.	Управление и организация (как процессы) не являются предметом рассмотрения, даже не определяются.

3. Особенности организационно-технических систем как предмета управления

Результаты методологии КД [1] позволяют обобщить и сформулировать особенности ОТС как объекта организации и управления и в итоге сформулировать в виде последовательности тезисов уточнённое описание предмета управления.

Здесь и далее в настоящей работе, если не оговорено особо, термин *управление* будем использовать в широком смысле, считая *организацию* одним из компонентов управления согласно [1].

В предыдущем разделе была показана первичность рассмотрения КД, которую осуществляет ОТС, откуда следует **тезис 1:** так как цель ОТС реализуется через цель выполняемой ею деятельности, то для решения задачи управления организационно-техническими системами - субъектами деятельности, необходимо управлять осуществляемой ими деятельностью.

Комплексная деятельность состоит из фрактальной иерархии элементов, каждый из которых характеризуется (рис. 3) *субъектом*, который реализует элемент КД и роль которого играет ОТС, *потребностями* (задающими требования к результату), *целями* и *задачами* (определяющими желательный, предвосхищаемый образ результата деятельности), *технологией* (системой условий, критериев, форм, методов и средств последовательного достижения поставленной цели, формируемой из вещественных объектов, знаний и информации), *предметом* (над которым выполняется деятельность и в роли которого могут выступать ОТС, люди, информация и знания, вещественные объекты), *действием*, *результатом*.

Таким образом, для осуществления КД необходимы:

- а) ОТС (или индивид как частный случай), выполняющие роль субъекта элемента КД;
- б) вещественные объекты и знания, обеспечивающие технологию;
- в) ОТС, или люди, или вещественные объекты, или знания которые составляют предмет элемента КД.

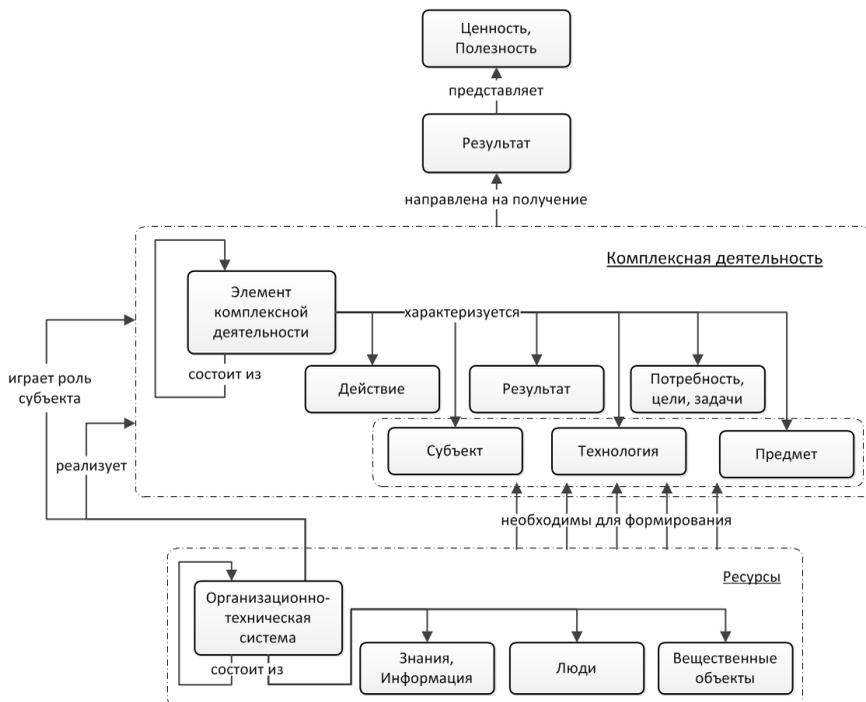


Рис. 3. Структура ОТС и КД

В этом смысле ОТС, люди, вещественные объекты, знания составляют *ресурсы* КД (ресурсы [1] - всё, что используется целевым образом, в том числе это может быть всё, что используется при целевой деятельности человека или людей).

Эти соображения позволяют сформулировать **тезис 2:** КД является фрактальной иерархией элементов, каждый из которых непосредственно связан с:

- 1) вышестоящим по целевой иерархии элементом КД, подцель которого реализует данный элемент КД;
- 2) нижестоящими по целевой иерархии элементами КД, которые реализуют подцели данного элемента КД;
- 3) ресурсами, обеспечивающими выполнение данного элемента КД.

Из наличия этих связей следует, что на множестве элементов КД могут быть определены бинарные отношения двух

видов: «цель–подцель» (они же - подчинённость, ответственность), отражающие первые две связи, и «потребитель–поставщик» ресурсов, отражающие третью связь.

Необходимость рассмотрения комплексной деятельности и её компонентов в течение их жизненных циклов (рис. 4) обусловлена простым соображением: периоду непосредственной реализации КД (или непосредственного использования ресурсов по назначению) всегда предшествует период проектирования или подготовки КД (создания ресурсов), в течение которого приходится нести издержки.

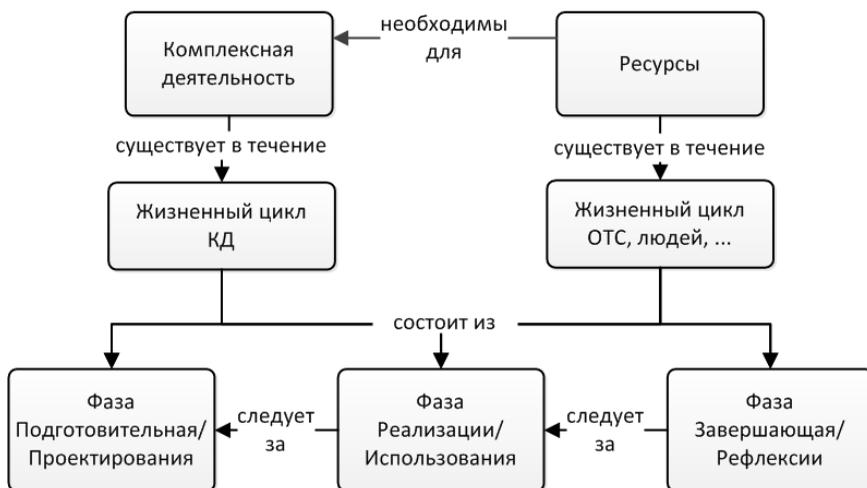


Рис. 4. Существование комплексной деятельности и ресурсов во времени

Вместе с этим, за периодом реализации КД (использования ресурсов) следует период завершения/рефлексии (в том числе - утилизации ресурсов), который также требует издержек. Это позволяет выделить три фазы жизненных циклов и сформулировать **тезис 3**: Комплексная деятельность (её элементы) и обеспечивающие её ресурсы существуют во времени в течение трёх фаз (рис. 4):

- **Фаза 1.** Условно назовём её подготовительной/проектирования, предшествующей {использованию ресурса

по назначению/реализации КД}, в течение которых {ресурс создаётся/КД проектируется}, так как до начала ЖЦ {ресурс/КД} не существует.

- Фаза 2. Фаза {использования ресурса/реализации КД}, в течение которой извлекается польза или создаётся ценность.

- Фаза 3. Завершающая/рефлексии фаза, следующая за {использованием ресурса по назначению/реализацией КД}, в течение которых ресурс утилизируется/происходит рефлексия КД, так как по завершении ЖЦ ресурс/КД прекращает своё существование.

Фазы жизненного цикла могут циклически повторяться, сменяя друг друга, также фазы допускают детализацию на стадии и этапы [1].

Все объекты, включаемые в область исследования КД, так или иначе описываются моделью структурного элемента деятельности [1], являющегося базовым в методологии комплексной деятельности. С одной стороны, КД имеет сложную иерархическую фрактальную структуру, и её элементы, требующие рассмотрения, разнородны, а с другой – элементы и КД, и её контекста существуют во времени в виде жизненных циклов. Поэтому при решении задачи управления КД ОТС необходимо рассматривать значительное количество разнородных ЖЦ – элементов деятельности, их процессуальных компонентов и связанных с ними элементов (рис. 3). Выявим набор классов ЖЦ, минимально необходимый для адекватного представления (моделирования) КД и ОТС.

Для этого перечислим жизненные циклы всех объектов и субъектов, в той или иной степени связанных с КД, выявим те, которые входят в другие или совпадают с ними (см. таблицу 2).

Из таблицы 2 следует, что для представления ЖЦ комплексной деятельности и её системного контекста достаточно формализма ЖЦ СЭДа, расширенного фазой формирования потребности в результатах комплексной деятельности (рис. 6). ЖЦ всех объектов, так или иначе связанных с КД, представимы в виде ЖЦ СЭДов или являются их частью:

Таблица 2. Анализ жизненных циклов

ПП	ЖЦ	Комментарий
1.	ЖЦ Ресурса. (ОТС, или персонала, или общественного объекта, или знаний, информации).	ЖЦ Ресурса в общем случае включает три фазы (см. тезис 4). Таким образом, ЖЦ ресурса сводится к последовательной реализации нескольких элементов КД – создание, использование, утилизация, поэтому ЖЦ ресурса может быть представлен как композиция нескольких элементов КД, а композиция элементов КД = элемент КД. Вывод: <i>ЖЦ ресурса может быть представлен (промоделирован) как ЖЦ элемента КД (см. рис. 5 ниже).</i>
2.	ЖЦ КД	КД является частным случаем элемента КД, поэтому ЖЦ КД представляется как ЖЦ элемента КД.
3.	ЖЦ элемента КД	Будем использовать его как основной элемент моделирования КД – ЖЦ структурного элемента деятельности – ЖЦ СЭДа.
4.	ЖЦ Субъекта	ОТС или индивид, как частный случай «ресурса (из списка п.1 данной таблицы)» становится субъектом КД, фиксируя спрос и приняв решение реализовывать КД. Поэтому ЖЦ субъекта совпадает с фазой использования ЖЦ «ресурса», и самостоятельно рассматривать ЖЦ субъекта нет необходимости.
5.	ЖЦ потребности, целей и задач	Потребность является внешней по отношению к КД, которую она вызывает, и предшествует ей: после того как будущий субъект фиксирует потребность, он реализует ЖЦ КД, чтобы удовлетворить потребность. Если формирование потребности само по себе представляет интерес для исследования, его необходимо моделировать. Но процесс формирования потребности – это деятельность, поэтому модель процесса формирования потребности – это модель ЖЦ КД. Если процесс формирования потребности не интересен для исследования, он представляется как начальное событие ЖЦ КД, которая этой потребности отвечает. Таким образом, ЖЦ потребности всегда может быть представлен в виде ЖЦ КД. Цели и задачи формируются и достигаются в рамках ЖЦ соответствующего элемента КД, поэтому самостоятельно рассматривать ЖЦ целей и задач нет необходимости.
6.	ЖЦ технологии	Организованная совокупность знаний/информации и вещественных объектов представляет собой технологию. Поэтому из соображений, аналогичных п.4, следует, что ЖЦ технологии совпадает с фазой использования ЖЦ «ресурса», и самостоятельно рассматривать ЖЦ технологии нет необходимости.

ПП	ЖЦ	Комментарий
7.	ЖЦ предмета	Любой из «ресурсов (из списка п. 1 данной таблицы)» может играть роль предмета КД, поэтому из соображений аналогичных п.4 следует, что ЖЦ предмета совпадает с фазой использования ЖЦ «ресурса», и самостоятельно рассматривать ЖЦ предмета нет необходимости.
8.	ЖЦ результата	Результат является конечным состоянием предмета, поэтому самостоятельно рассматривать ЖЦ результата нет необходимости.

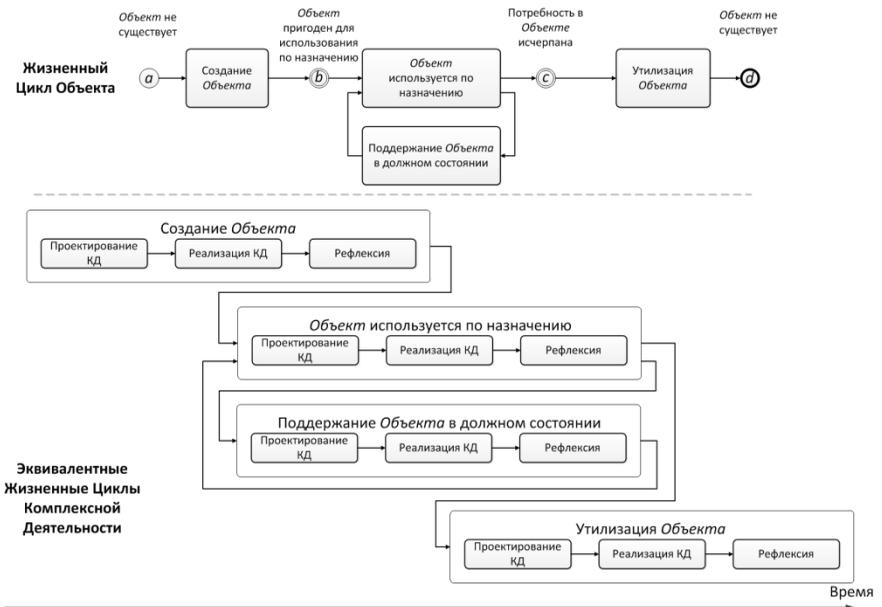


Рис. 5. Представление ЖЦ ресурса жизненными циклами КД

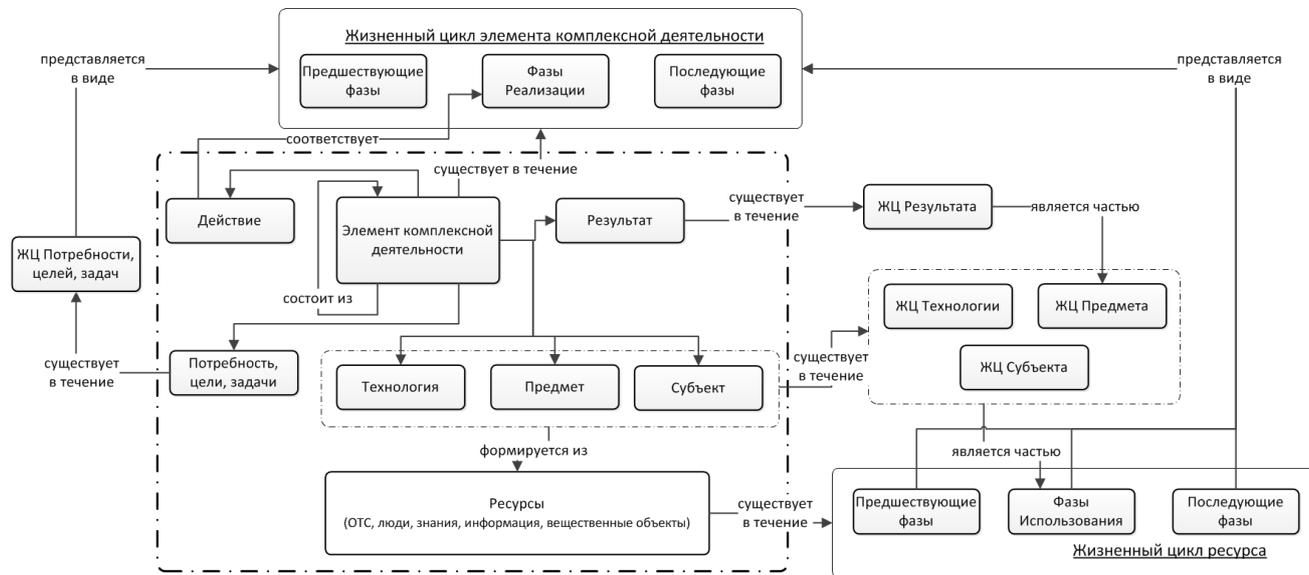


Рис. 6. Связи между ЖЦ элементов КД

- существование во времени технологии, субъекта и предмета (и результата) моделируется как ЖЦ ресурсов, который в свою очередь представляется в виде ЖЦ СЭДов;
- существование во времени потребности, целей, задач, действия моделируется как ЖЦ СЭДов.

Отметим, что на множестве жизненных циклов (таблица 2) можно определить некоторые классы эквивалентности. Основанием для этой классификации является следующее соображение. Все объекты, перечисленные в пп. 2-8, являются в определённом смысле индивидуальными, единичными, уникальными: они относятся к конкретным экземплярам элементов КД или их процессуальных компонентов.

В отличие от этих объектов, ресурсы (п. 1) могут также быть уникальными, но могут и представлять собой группы экземпляров, обладающих эквивалентными свойствами – так называемые *пулы ресурсов*. Деятельность, осуществляемая над ними, также однородна, поэтому для компактности представления некоторые элементы деятельности над эквивалентными ресурсами можно объединить. С практической точки зрения такие элементы КД соответствуют решению *задач управления пулами ресурсов* (включая их создание) – людских, запасов, материалов, оборудования, энергоносителей и других.

Таким образом, сформулируем **тезис 4**: Жизненные циклы элементов КД и их компонентов вместе с ЖЦ ОТС и ЖЦ ресурсов могут быть представлены совокупностью взаимосвязанных ЖЦ СЭДов, часть которых решает задачи управления пулами ресурсов (их особенность – «групповой» предмет СЭДа).

Объединяя определение управления (см. выше), а также тезисы 1-4, формализуем поставленную задачу управления ОТС, сделаем это в формате таблицы 3.

Таблица 3. Логика постановки задачи управления ОТС

Тезис 1	Так как цель ОТС реализуется через цель выполняемой ею деятельности, то для решения задачи управления ОТС - субъектами деятельности - необходимо управлять осуществляемой ими деятельностью.
Тезис 2	КД является фрактальной иерархией элементов, каждый ее элемент непосредственно связан с: 1) вышестоящим по целевой иерархии элементом КД, подцель которого реализует данный элемент КД; 2) нижестоящими по целевой иерархии элементами КД, которые реализуют подцели данного элемента КД; 3) ресурсами, обеспечивающими выполнение данного элемента КД.
Тезис 3	Комплексная деятельность и обеспечивающие её ресурсы существуют во времени в течение трёх фаз, т.е. их ЖЦ состоят из трёх фаз.
Тезис 4	Жизненные циклы элементов КД и их компонентов вместе с ЖЦ ОТС и ЖЦ ресурсов могут быть представлены совокупностью взаимосвязанных ЖЦ СЭДов, часть которых решает задачи управления пулами ресурсов.
Тезисы 1-4 позволяют сформулировать промежуточное утверждение: (Организация и) Управление ОТС должно реализовываться в форме управления совокупностью соответствующих взаимосвязанных жизненных циклов СЭДов.	

Наличие совокупности взаимосвязанных объектов - жизненных циклов СЭДов - в качестве предмета управления накладывает на него дополнительное требование: необходимо не только учитывать, но и устанавливать связи между жизненными циклами. Подчёркивая эту особенность, будем говорить о согласованном управлении жизненными циклами в смысле обеспечения их *согласованности*¹. Согласование, как приведение в надлежащее состояние и/или установление связей является частным случаем *организации*.

¹ *СОГЛАСОВАТЬ*, [17] - 1. что и что с чем. Привести в связь, в согласие, в надлежащее соотношение, установить соответствие между чем-нибудь, устранив разногласия, противоречия. Согласовать интересы разных сторон. Согласовать расписание движения поездов с прибытием пароходов. 2. что с кем-чем. ...

СОГЛАСОВАТЬ [14] – 1. что и что с чем. Привести в надлежащее соотношение, соответствие с чем-н.

Для приведения в надлежащее состояние каких-либо объектов и/или установления связей между ними необходимы основания. Применительно к жизненным циклам СЭДов такими основаниями являются все объекты и субъекты, в той или иной степени связанные с КД, использующиеся при анализе множества жизненных циклов и образующие строки таблицы 2: Ресурсы; Субъекты; Потребности, Цели и задачи; Технологии; Предметы; Результаты.

Таким образом, сформулируем **тезис 5**: (Организация и) Управление ОТС должно реализовываться в форме согласованного управления совокупностью взаимосвязанных жизненных циклов соответствующих СЭДов.

4. Средства решения проблемы управления ОТС и субъект управления

Структурируем сформулированную в виде **тезиса 5** *проблему управления ОТС* и зафиксируем средства её решения.

Управление ОТС – это воздействие на поведение (последовательную смену состояний) всей многоуровневой иерархии СЭДов для достижения требуемого результата. Проанализируем основные факторы, влияющие на результат КД, «детерминанты результата».

Результат деятельности [1] формируется в процессе осуществления субъектом деятельности согласно технологии. Следовательно, **технология является одним из детерминантов результата деятельности.**

Многоуровневой иерархии СЭДов соответствует иерархия субъектов, которой свойственно следующее потенциальное системное противоречие. Оно заключается в возможном несовпадении интересов и «внутренних» целей субъекта как активной ОТС (класса II) и «внешних» для него целей¹ роли субъекта КД, которую он играет в составе ОТС с заданными извне целями (класса I). С точки зрения проблемы управления ОТС несовпа-

¹ Целеполагание и классы ОТС, а также источник данного несовпадения обсуждались во введении.

дение интересов субъектов вызывает нарушения реализации субъектом жизненных циклов элементов КД (прежде всего в форме отказа от выполнения роли субъекта ещё до начала жизненного цикла КД). Что, в свою очередь, порождает тренд естественного рассогласования жизненных циклов различных элементов КД, соответствующих несовпадающим целям субъектов. Рассогласование или, напротив, **согласованность ЖЦ СЭДов является вторым детерминантом результата деятельности.**

В течение жизненного цикла КД могут происходить события неопределённости, также влияющие на результат. Истинная неопределённость КД нарушает исполнение технологии, поэтому при разработке технологии необходимо предусматривать варианты реакции на истинную неопределённость и критерии идентификации событий истинной неопределённости, требующих модификации технологии (так как устранению подлежит только измеримая неопределённость, что осуществляется за счет включения в технологию сценариев реакции на измеримую неопределённость). Наступление событий истинной неопределённости делает технологию КД неадекватной складывающимся условиям, поэтому реакцией на такие события является изменение технологии. Из-за возможности наступления (в любой момент ЖЦ любого СЭДа) событий истинной неопределённости разработка/модернизация технологии может выполняться многократно – первоначально в ходе синтеза, далее - в ходе конкретизации, и реализации КД. **События неопределённости являются третьим детерминантом результата деятельности.**

То есть результат КД детерминируется:

- 1) технологией, которая должна включать сценарии реакции на измеримую неопределённость и правила идентификации событий истинной неопределённости;
- 2) согласованностью реализации субъектами жизненных циклов КД;
- 3) характеристиками события неопределённости.

Рассмотрим потенциальные средства управления - возможности влияния на результат деятельности посредством влияния на его детерминанты.

1. Начнём с воздействия на технологию КД. *Технология* определяется в [1] как система условий, критериев, форм, мето-

дов и средств последовательного достижения поставленной цели, формируемая из ресурсов - вещественных объектов, знаний и информации. Средствами воздействия на технологию являются такие компоненты управления как *синтез* и *конкретизация* (см. раздел «Обзор основных результатов методологии комплексной деятельности» и подробное рассмотрение компонентов управления в разделе 7.2 [1]). Синтез включает, например, создание алгоритмов, регламентов, правил выполнения действий, инструментов, оборудования, зданий, найм и обучение сотрудников. Конкретизация касается как информационных/знаниевых компонентов, так и назначения конкретных экземпляров ресурсов на роли субъектов и вещественных компонентов технологии (в частности – конкретизацию причинно-следственной модели в виде календарно-сетевых планов/графиков, назначение сотрудников на конкретные роли субъектов, определение и назначение конкретных единиц оборудования и т.п.).

Синтез и конкретизация различаются следующим признаком:

- синтез, будучи выполнен однократно, позволяет реализовать несколько жизненных циклов деятельности;
- конкретизация обязательно должна выполняться в каждом жизненном цикле.

Структурируем синтез по основанию, вещественным или информационным является создаваемый компонент технологии, на два компонента:

- а) создание информационных/знаниевых компонентов технологии в виде информационных моделей;
- б) создание пулов вещественных ресурсов для обеспечения ролей субъектов и вещественных компонентов технологии (понимая, что их созданию всегда предшествует формирование соответствующей информационной модели).

Такое разделение отвечает общепринятой практике, когда сначала создаются и оптимизируются информационные модели технологии (алгоритмы, правила, регламенты, спецификации, в том числе и вещественных ресурсов), после чего уже создаются вещественные компоненты (пулы вещественных ресурсов).

Структурировать аналогично конкретизацию не целесообразно, потому что на практике планирование и назначение ресурсов производится в рамках единого итеративного процесса, так как календарно-сетевые планы и графики должны быть обеспечены ресурсами. При этом сам процесс носит характер строгого исполнения соответствующих регламентов, нарушаемых событиями неопределённости, а регламенты должны быть описаны ранее в ходе создания информационных моделей (в ходе синтеза) с учётом характеристик неопределённости.

Таким образом, средствами влияния на результат КД посредством влияния на технологию являются синтез, структурированный на компоненты (а) и (б), и конкретизация.

2. Согласованность жизненных циклов КД может нарушаться из-за несовпадения целей/интересов субъектов, поэтому средством устранения данного нарушения является согласование интересов и, как следствие, целей субъектов. Согласование интересов представляет собой установление определённых связей между субъектами, упорядочивание субъектов, т.е. согласование интересов является организацией и, следовательно, управлением. Согласование интересов производится при назначении конкретных экземпляров ресурсов на роли субъектов, т.е. при конкретизации¹. Поэтому согласование интересов как компонент управления является частным случаем конкретизации. Тогда конкретизацию декомпозируем также на два компонента нижестоящего уровня, один из которых будет включать все управленческие активности кроме согласования интересов, условно назовём его *календарно-сетевым планированием и назначением ресурсов*, а второй – согласование интересов субъектов.

3. Средств воздействия на события неопределённости не существует, можно только учитывать измеримую неопределён-

¹ *Непосредственно при конкретизации происходит реализация согласования интересов, в то время как механизм согласования разрабатывается в ходе синтеза – создания компонентов технологии. Эта же схема справедлива и для всех остальных компонентов управления. Подробнее вопрос создания механизмов на одних этапах жизненного цикла, а их реализации на других, обсуждается ниже – при формулировании тезиса 7.*

ность в рамках синтеза и конкретизации, а также оперативно детектировать наступление событий неопределённости и реагировать на них должным образом в течение всего жизненного цикла КД.

Таким образом, сформулируем **тезис 6**: Проблема согласованного управления ОТС в форме организации и управления совокупностью взаимосвязанных ЖЦ СЭДов может решаться путём реализации следующих компонентов управления:

- синтеза в составе:
 - создания компонентов технологии, в том числе ресурсов и механизмов согласования интересов, в виде информационных моделей;
 - создания пулов вещественных ресурсов для обеспечения ролей субъектов и компонентов технологии;
- конкретизации в составе:
 - календарно-сетевого планирования и назначения ресурсов
 - реализации механизмов согласования интересов субъектов элементов КД.

Все компоненты управления должны разрабатываться и реализовываться с учётом необходимости устранения измеримой неопределённости - включения в рассмотрение сценариев реакции на измеримую неопределённость, а также допускать возможность многократного выполнения синтеза из-за наступления событий истинной неопределённости. Также все компоненты управления должны обеспечивать возможности «контроля неопределённости» - оперативного детектирования событий неопределённости и реагирования на них должным образом в течение всего жизненного цикла КД.

Заметим, что ОТС второй группы сами определяют цели КД соответственно своим интересам, поэтому сами специфицируют требования и создают технологию своей КД и в этом смысле осуществляют самоуправление.

Заметим также, что компоненты управления и неопределённость влияют на согласованность жизненных циклов элементов КД. Причём синтез и конкретизация обеспечивают согласованность по различным основаниям, а неопределённость –

нарушает согласованность. Рис. 7 иллюстрирует основания, на согласованность по которым влияют компоненты управления.

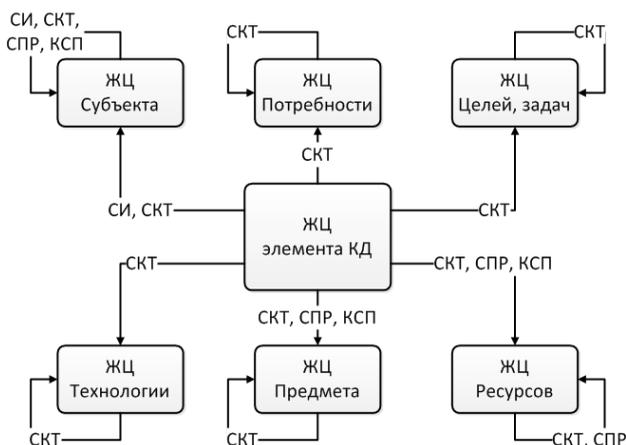


Рис. 7. Влияние компонентов управления на согласованность жизненных циклов КО

Прямоугольниками с закруглёнными углами обозначены жизненные циклы, подлежащие согласованию, а стрелками – компоненты управления, обеспечивающие согласование. На рис. 7 использованы следующие сокращения названий компонентов управления:

СКТ - создание компонентов технологии в виде информационных моделей;

СПР - создание пулов вещественных ресурсов;

КСП - календарное-сетевое планирование и назначение ресурсов;

СИ - согласование интересов субъектов элементов КО.

Рассмотрим теперь порядок решения проблемы управления ОТС и соотнесём компоненты управления с жизненным циклом самой комплексной деятельности (см. рис. 8).

На этапе анализа потенциальный субъект КО анализирует внешний для него спрос (на результаты деятельности) и ситуацию в целом, опыт своей предшествующей деятельности и свои общие возможности по удовлетворению спроса. Фактически при этом потенциальный субъект сопоставляет свои «внутренние»

интересы с «внешними», выраженными в спросе. Если интересы оказываются согласованными, он принимает решение выполнять деятельность и начинает реализовывать ЖЦ: структурирует цель и задачи. При несогласованности интересов происходит отказ от выполнения роли субъекта КД.

На этапе синтеза создаётся технология КД - логическая и причинно-следственная модели КД, формируются ресурсы, т.е. синтезируется будущая деятельность, ее элементы, связи между ними и т.д., всё это описывается в виде информационных моделей. Ни субъекты, ни ресурсы этих элементов пока ещё не назначены.

На этапе конкретизации производится сначала уточнение причинно-следственной модели в виде календарно-сетевых планов/графиков, а потом - запрос и получение ресурсов для назначения субъектов нижестоящих СЭДов и обеспечения технологий нижестоящих операций – наполнение ролей субъектов и ресурсов конкретными экземплярами. Таким образом производится установление конкретных связей между субъектами вышестоящих и нижестоящих СЭДов друг с другом и с ресурсами, в том числе, осуществляется согласование интересов субъектов.

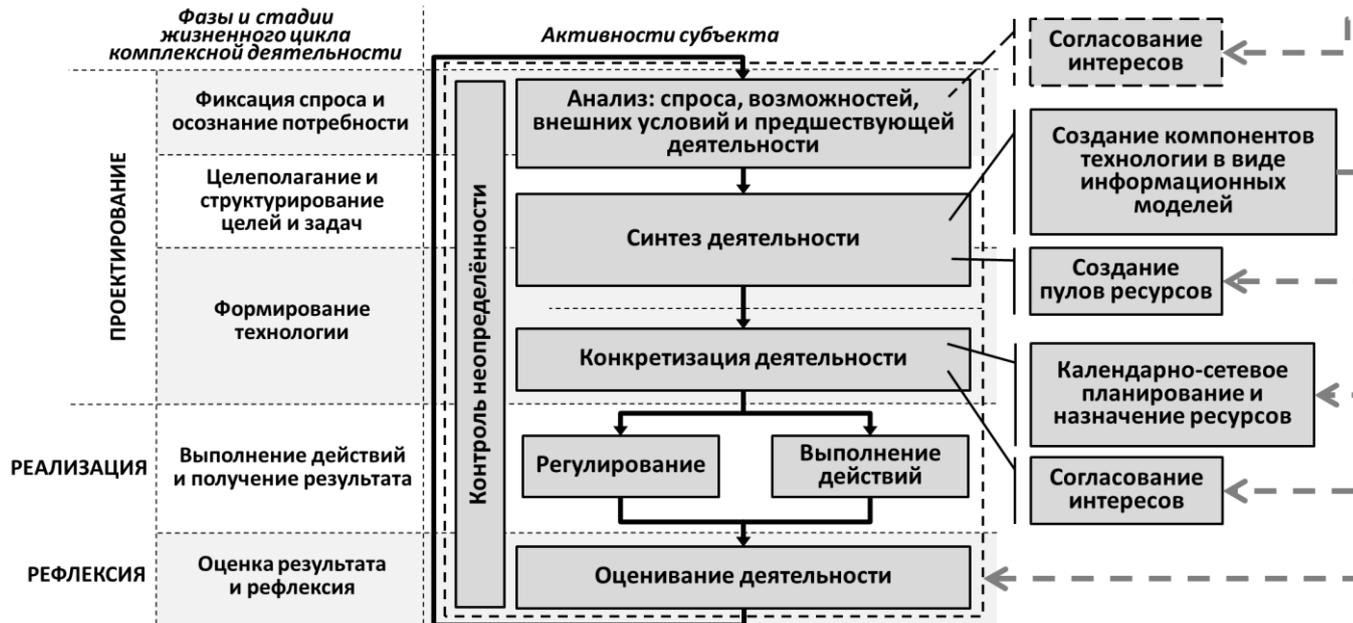


Рис. 8. Активности субъекта в жизненном цикле КД [1]

В ходе регулирования субъект КД контролирует наступление условий (в том числе наступление событий неопределённости) согласно технологии КД и инициирует выполнение действий нижестоящих элементов КД.

В завершение субъект КД осуществляет рефлексию и оценивает полученные результаты.

Необходимо отметить, что согласование интересов субъектов выполняется как на этапе анализа, так и на этапе конкретизации. В первом случае потенциальный субъект согласует свои «внутренние» интересы с выраженными в виде спроса «внешними» для него интересами потенциальной роли субъекта элемента КД. Во втором случае субъект задаёт спрос и через него «внешние» интересы для потенциальных субъектов нижестоящих по целевой структуре и по логической модели элементов КД. В первом случае субъект играет роль «агента» и осуществляет активный выбор (являясь при этом, вообще говоря, «управляемым объектом»), а во втором – роль *центра* (в терминах теории активных систем и теории управления организационными системами), осуществляющего управление и определяющего технологию согласования интересов. Данная двойственность отражает фрактальные и иерархические свойства структуры КД.

Все компоненты управления являются, безусловно, важными, однако создание компонентов технологии в виде информационных моделей имеет исключительное значение, так как в ходе него формируются технологии всех остальных компонентов (серые штриховые стрелки на рис. 8). При выполнении компонентов лишь реализуются технологии и происходят события неопределённости, что фиксирует результат.

Таким образом, результат выполнения всех остальных компонентов и КД в целом фактически определяется с точностью до событий неопределённости именно при создании компонентов технологии на этапе синтеза.

Сформулированные соображения позволяют зафиксировать **тезис 7**: Проблема управления решается, вообще говоря, на всех фазах и этапах жизненного цикла КД. Решающее влияние на результативность и эффективность КД оказывает создание компонентов технологии (в том числе компонентов управления – синтеза и конкретизации) в виде информационных моде-

лей на этапе синтеза. Компоненты управления, будучи созданными в ходе синтеза, «автоматно» реализуются на других этапах жизненного цикла.

Отметим, что во многих практически интересных случаях деятельность ОТС носит циклический характер. Совершенно естественными являются циклы, связанные, например, с многократным повторением:

- одной типовой операции;
- изготовления детали или изделия, или оказанием определённой услуги;
- рабочей смены или рабочего дня;
- отчётного/календарного периода.

Часто после того как субъект фиксирует спрос, согласует свои интересы с «внешними интересами», осознаёт потребность в новой деятельности и формирует технологию, потом он многократно реализует её в ходе выполнения повторяющихся циклов КД.

В частности, при организации нового бизнеса определяется предмет бизнеса, организуется фирма, которая в течение как можно большего количества периодов реализует деятельность соответственно технологии. Сотрудник при приёме на работу однократно принимает принципиальное решение выполнять возлагаемые на него обязанности, после чего многократно выполняет их. Технология остаётся неизменной до тех пор, пока не возникает необходимость её модернизации, после которой снова продолжается циклическая реализация КД с постоянной технологией.

При многократном повторении циклов субъект осуществляет, тем не менее, и анализ, и синтез (по крайней мере, в виде планирования деятельности на текущий или следующий период), а также рефлексии (по крайней мере, оценивание результатов КД за период), реализуя все этапы ЖЦ КД (см. рис. 9).

При многократной повторяемости циклов КД синтез и конкретизация выполняются параллельно реализации, а аналитические активности рефлексии и анализа фактически объединяются, замыкая управленческий цикл.

Предположение повторяемости циклов также соответствует общепринятому принципу “Going Concern”, обычно применяемому при рассмотрении любого бизнеса: считается, что фирма осуществляла свою деятельность и в предыдущие периоды, и будет это делать в последующие.

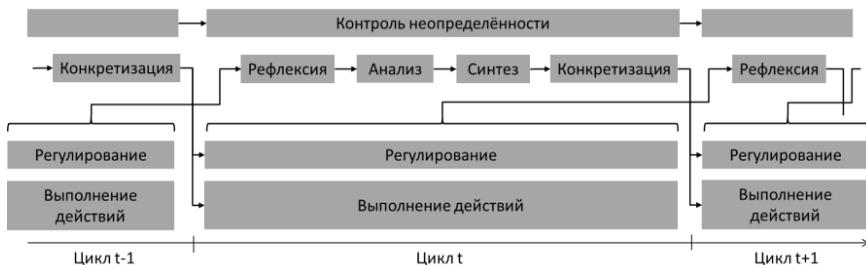


Рис. 9. Цикличность активностей субъекта комплексной деятельности

Многочисленное повторение жизненных циклов приводит к тому, что однажды созданные в виде информационных моделей компоненты технологии и пулы ресурсов используются многократно, поэтому в целях сохранения общности будем называть компоненты управления, на которые декомпозируется синтез не «созданием», а «управлением», а именно:

- управление компонентами технологии, в том числе ресурсов, в виде информационных моделей;
- управление пулами вещественных ресурсов для обеспечения ролей субъектов и компонентов технологии.

Рис. 10 иллюстрирует уточнённую декомпозицию компонентов управления с выделением наиболее значимых на нижнем уровне иерархии.

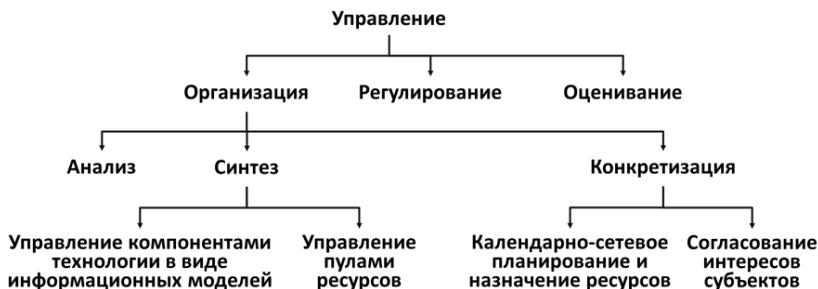


Рис. 10. Детализированная структура компонентов управления

Управление совокупностью жизненных циклов взаимосвязанных элементов комплексной деятельности требует уточнения понятий субъекта и объекта управления, субъекта элемента КД, а также связей между этими понятиями. В [1] показано (см. также раздел 2.1), что любая комплексная деятельность, кроме исполнения специфических элементарных операций, является управлением, т.е. деятельность субъекта каждого СЭДа (СЭД_N на рис. 11) заключается в:

- управлении подчинёнными и нижестоящими по целевой структуре СЭДами (СЭД_{N,1}, ..., СЭД_{N,M}), при этом он выступает в роли субъекта соответствующего управления;
- исполнения специфических элементарных операций (если в состав данного СЭДа входят элементарные операции).

Субъект любого СЭДа (например, СЭД_N) непосредственно управляет СЭДами и их субъектами (СЭД_{N,1}, ..., СЭД_{N,M}), входящими в данный СЭД (СЭД_N), и опосредованно, через субъекты других СЭДов (например, через субъекта СЭД_m) – всеми нижестоящими по целевой иерархии СЭДами (СЭД_{m,1}, ..., СЭД_{m,K} и нижестоящими по отношению к ним).

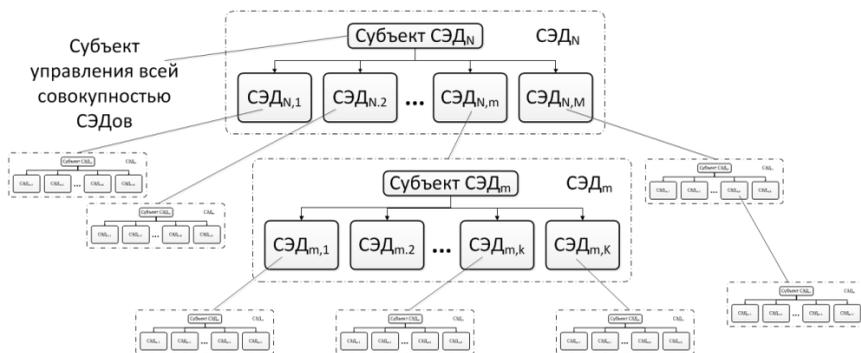


Рис. 11. Структура СЭДов

Следует заметить, что субъект любого СЭДа в определённом смысле осуществляет «самоуправление». На этапе синтеза субъект СЭДа формирует логическую и причинно-следственную модели данного СЭДа и технологии элементарных операций, входящих в состав данного СЭДа, а на этапе конкретизации назначает ресурсы элементарных операций и таким образом существенно влияет на своё будущее поведение. То есть выполняет по отношению к самому себе действия, подпадающие под определение управления. В этом также проявляется некоторая двойственность самоуправления: создание технологии, с одной стороны, является деятельностью, а с другой – влияет на будущее поведение субъекта в период осуществления им действий согласно технологии.

Таким образом, управление всей совокупностью СЭДов осуществляет или (I) субъект вышестоящего в совокупности СЭДа (субъект СЭД_N на рис. 11), или (II) субъект некоторого «внешнего» СЭДа, вышестоящего по отношению ко всей совокупности СЭДов. Фактически этот «внешний» СЭД объединит всю управляемую совокупность и, таким образом, вторая альтернатива (II) сводится к первой (I), проиллюстрированной рис. 11. Эти соображения позволяют сформулировать **тезис 8**: управление всей совокупностью СЭДов осуществляет субъект вышестоящего в совокупности СЭДа (как отмечалось выше, он также выполняет и самоуправление, реализуя по отношению к себе действия, подпадающие под определение управления).

Применительно к проблеме управления ОТС это означает, что субъектом управления является или некоторая управляющая подсистема исходной ОТС, или ОТС, внешняя по отношению к исходной ОТС, субъект которой сформулировал цели исходной ОТС.

Из тезиса 8 следует, что для активных ОТС (см. введение), отсутствуют субъекты управления, т.е. активные ОТС «неуправляемы извне»; можно говорить, что они осуществляют самоуправление.

5. Формализация проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС

Резюмируем тезисы 1-8 и зафиксируем постановку проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС, вынесенную в название настоящей работы. Рис. 12 иллюстрирует структуру тезисов.

Тезисы 1-4 позволили сформулировать постановку проблемы управления ОТС в виде **тезиса 5**: управление ОТС должно реализовываться в форме согласованного управления совокупностью взаимосвязанных жизненных циклов СЭДов. Из **тезиса 5** был получен **тезис 6**, зафиксировавший компоненты управления как средства решения проблемы управления ОТС и особенности их реализации. На основании **тезиса 6** зафиксированы **тезисы 7 и 8**, определившие порядок управления и субъектов, его осуществляющих.

Объединяя тезисы, сформулируем *постановку проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС*:

Управление ОТС осуществляется в форме согласованного управления совокупностью взаимосвязанных ЖЦ структурных элементов КД, реализуемой этой ОТС.

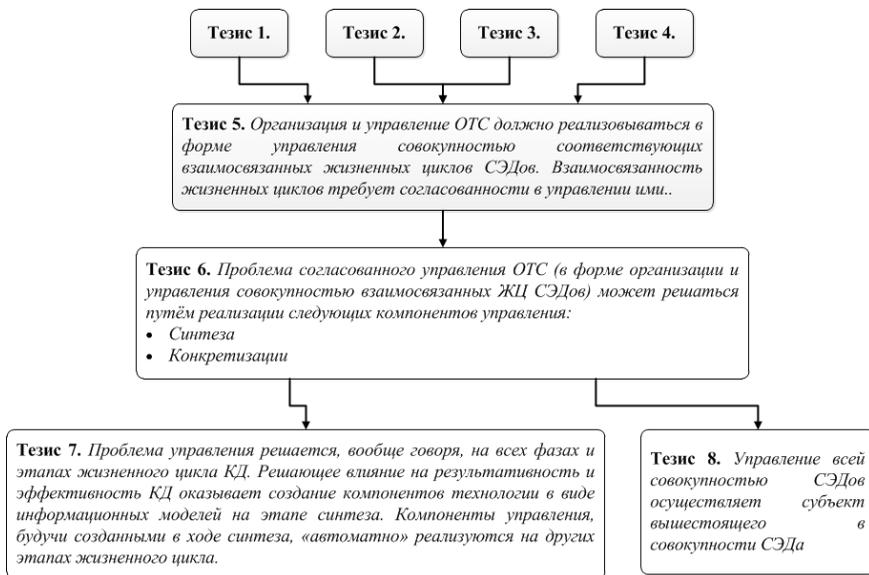


Рис. 12. Структура постановки проблемы управления ОТС

Средствами решения проблемы управления ОТС являются компоненты управления: синтез (управление компонентами технологии, в том числе ресурсов, в виде информационных моделей; управление пулами вещественных ресурсов для обеспечения ролей субъектов и компонентов технологии) и конкретизация (календарно-сетевое планирование и назначение ресурсов; и согласование интересов субъектов).

Проблема управления ОТС должна решаться с учётом необходимости устранения измеримой неопределённости - включением в рассмотрение сценариев реакции на измеримую неопределённость, а также допускать возможность многократного последовательного решения из-за наступления событий истинной неопределённости в течение жизненных циклов элементов КД.

Проблема управления ОТС решается, вообще говоря, на всех фазах и этапах жизненных циклов их деятельности. Решающее влияние на результативность и эффективность КД оказывает создание компонентов технологии (в том числе и компо-

нентов управления) в виде информационных моделей на этапе синтеза. Еще раз подчеркнём, что компоненты управления, будучи созданными в ходе синтеза, «автоматно» реализуются на других этапах жизненного цикла.

Решение проблемы управления всей совокупностью СЭДов осуществляет субъект вышестоящего в совокупности СЭДа (он также выполняет и самоуправление).

Рассмотрим систему моделей, которая может обеспечить решение проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС. Для этого формально опишем поведение управляемой системы и формирование результата КД с учётом управляющих воздействий - процесс реализации жизненного цикла СЭДа и компонентов управления.

Проанализируем причинно-следственную цепочку формирования результата КД, иллюстрируемую рис. 13. Прямоугольники с закруглёнными углами представляют компоненты управления (a, b, e, f) и действия (i), выполняемые субъектом. Кругами отражены состояния компонентов технологии в виде информационной модели (c, g , верхний ряд) и состояния вещественных ресурсов, из которых формируются субъекты, предметы и вещественные компоненты технологии (d, h , нижний ряд). Сплошные стрелки показывают связи типа «вход–выход», а серые штриховые стрелки отражают создание компонентов технологий. Внизу перечислены фазы жизненного цикла и соответствующие им компоненты управления субъекта СЭДа.

Модель жизненного цикла КД обуславливает получение результата завершением действия (i) на фазе реализации (правая часть рис. 13). Действие не может быть выполнено, если не назначены ресурсы, не сформирован предмет (h), не подготовлены планы, регламенты, технологические карты и т.д. (g), не согласованы интересы субъектов нижестоящих СЭДов (f). То есть не завершена конкретизация. Для выполнения конкретизации требуются предварительно созданные информационные модели компонентов технологий в абстрактной форме (c) и ресурсы в составе пулов (d). Информационные модели и пулы ресурсов в свою очередь являются продуктами соответствующих управленческих активностей (a) и (b).

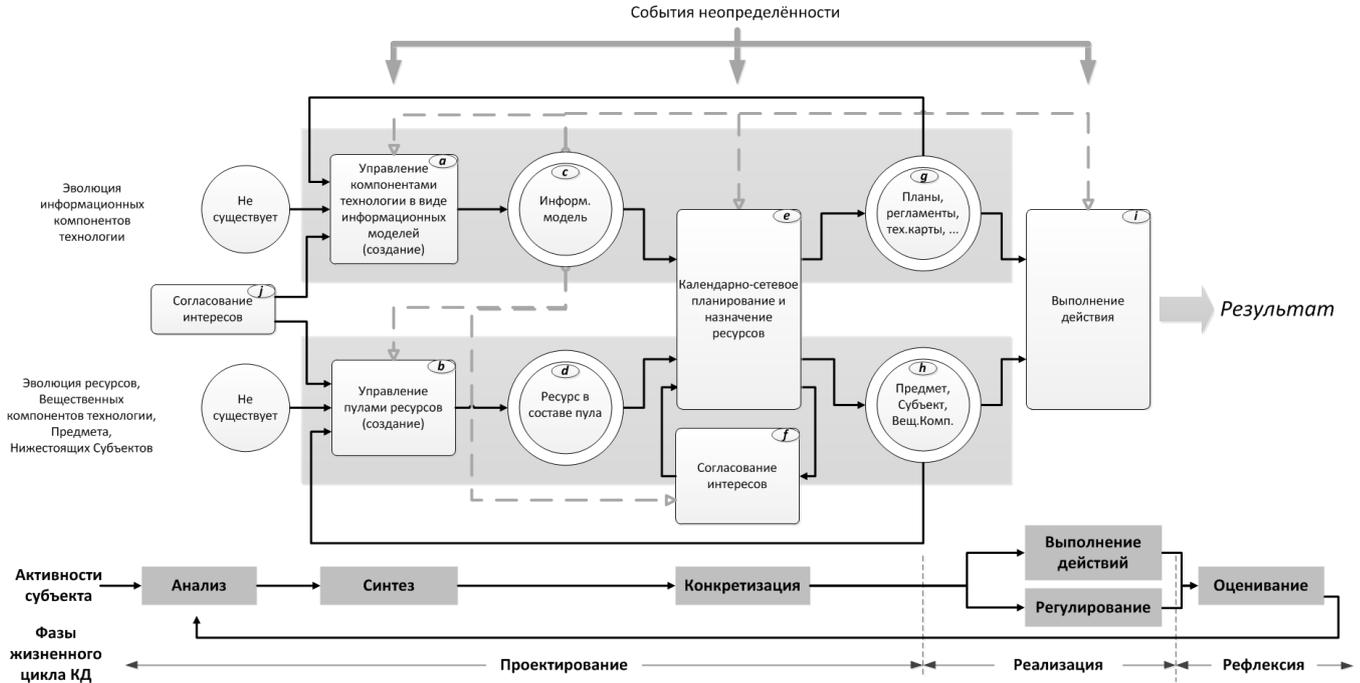


Рис. 13. Причинно-следственная цепочка формирования результата КД

При многократной реализации жизненных циклов информационные модели компонентов технологии и ресурсы используются повторно, что отражают соответствующие стрелки на рис. 13 от (g) к (a) и от (h) к (b).

Рассмотренная причинно-следственная цепочка получения результата позволяет говорить, что поведение СЭДа связано с изменением его состояний, описываемых:

- *Параметрами субъекта* (выбранным им действием в терминах ТУОС).
- *Параметрами ресурсов*, обеспечивающих технологию и составляющими предмет КД.
- *Параметрами нижестоящих субъектов*.
- *Параметрами¹ компонентов технологии*, представленных в виде информационных моделей.

Изменения состояний СЭДа вызваны выполнением компонентов управления (*a, b, e, f*) и действия (*i*), сопровождаемых воздействием событий неопределённости.

Будем моделировать процессы выполнения компонентов управления (*a, b, e, f*) и действия (*i*) функциями, которые представлены в таблице 4.

Определим *технологическую функцию* (ТФ) - аналог производственной функции, - которая характеризует *выполнение действия* на данном жизненном цикле; управление пулами ресурсов будем представлять в виде *функций эволюции пулов ресурсов* (ФР); *функцией календарно-сетевого планирования и назначения ресурсов* (ФК), *функцией согласования интересов субъектов* (ФС) и *функцией управления (создания) компонентами технологии в виде информационных моделей* (ФИ) опишем одноимённые процессы. Введённые функции формализуют технологию СЭДа. В данной нотации технологическую функцию имеет смысл рассматривать как спецификацию технологии в узком смысле, определяющую непосредственно дей-

¹ Термин «параметры» в отношении компонентов технологий, представленных в виде информационных моделей, используется весьма условно, так как спецификации компонентов технологии настолько обширны, что к «параметрам» следует относить информационные модели полностью.

ствие - этап реализации ЖЦ КД. Композиция всех функций ТФ, ФР, ФК, ФС и ФИ специфицирует технологию в широком смысле, описывающую весь жизненный цикл КД.

Таблица 4. Функции компонентов управления (*a, b, e, f*) и действия (*i*)

	Аргументы	Функция
ТФ	1. Параметры субъекта 2. Параметры назначенных ресурсов, обеспечивающих технологию 3. Параметры нижестоящих субъектов 4. Параметры неопределённости действий	Параметры результата (или полезности)
ФК	1. Параметры состояния пулов ресурсов на данном жизненном цикле 2. Параметры управляющего воздействия со стороны субъекта 3. Параметры неопределённости конкретизации	Параметры назначенных ресурсов, обеспечивающих технологию
ФС	1. Параметры состояния пулов ресурсов на данном жизненном цикле 2. Параметры управляющего воздействия со стороны субъекта 3. Параметры неопределённости согласования	Параметры назначенных нижестоящих субъектов
ФР	1. Параметры состояния пулов ресурсов на предыдущем жизненном цикле 2. Параметры управляющего воздействия со стороны субъекта 3. Параметры неопределённости ресурсов	Параметры состояния пулов ресурсов на данном жизненном цикле
ФИ		Параметры компонентов технологии, представленных в виде информационных моделей – ТФ, ФР, ФК, ФС, ФИ.

Соответственно будем рассматривать функции ТФ, ФР, ФК, ФС, ФИ как информационные модели компонентов технологии, и следовательно, как выходы функции управления компонентами технологии (ФИ).

Функция управления компонентами технологии (ФИ) слабо поддаётся формализации, что создаёт существенную методическую сложность оперирования ею. Причиной являются свойственные этому компоненту управления эвристики, составляющие его основное содержание. Поэтому в таблице аргументы функции не параметризованы. Кроме того в качестве одного из её выходов символически указана сама функция, что собственно и имеет место при создании новых априори неизвестных технологий. Условная формализация этой функции и связанные задачи рассмотрены в следующем разделе.

В противоположность функции управления компонентами технологии все остальные функции (ТФ, ФК, ФС, ФР) хорошо формализуемы. Они составляют естественную композицию в том смысле, что выходные значения одной из них являются входными для другой. Будем использовать эту композицию для обозначения совокупности функций (ТФ, ФК, ФС, ФР), когда это необходимо, и называть её «расширенной технологической функцией», РТФ.

Будем рассматривать следующие виды неопределённости:

- *неопределённость действия*, вызванная событиями, произошедшими в ходе выполнения действия данного цикла (состояний некоторой априори непредсказуемой, но апостериори наблюдаемой, «природы»);
- *неопределённость КСПУ*, вызванная событиями, происходящими при календарно-сетевом планировании и назначении ресурсов;
- *неопределённость согласования*, вызванная событиями, происходящими при согласовании интересов субъектов;
- *неопределённость ресурсов*, вызванная событиями неопределённости, влияющими на состояния пулов ресурсов на текущем жизненном цикле.

События измеримой неопределённости всех видов можно считать независимыми (это следует из предположения об эффективности субъекта: если субъект наблюдает некоторую закономерность, он её учтёт, после чего «остаточная» неопределённость снова станет независимой), т.е. параметры всех видов неопределённости независимы. Независимость параметров

неопределённости различных видов означает, допустимость их независимого устранения. Будем моделировать их независимыми случайными процессами, причём из предположения об эффективности субъекта следует также независимость их значений на различных промежутках времени и различных ЖЦ, т.е. марковское свойство. В дальнейшем будем называть эти процессы, отражающие параметры измеримой неопределённости, «неопределёнными процессами».

Опишем компоненты управления в терминах введённых функций и параметров состояния СЭДа в сопоставлении с фазами ЖЦ КД (реализация компонентов рассмотрена в «хронологическом» порядке с пометками буквами согласно рис. 13).

(j). Согласование интересов на этапе анализа означает принятие потенциальным субъектом решения и выбор им действия, в результате чего определяются значения параметров субъекта.

(a). Создание компонентов технологии в виде информационных моделей означает синтез функций ФТ, ФС, ФК, ФР – фиксацию параметров компонентов технологии, представленных в виде информационных моделей.

(b). Создание и управление пулами ресурсов означает выбор субъектом значения управляющего воздействия на пулы ресурсов. Этот выбор совместно с (неуправляемой субъектом) реализацией событий неопределённости ресурсов, детерминирует согласно функции ФР значения параметров состояний пулов ресурсов.

(e) и (f). Календарно-сетевое планирование, назначение ресурсов и согласование интересов означает конкретизацию технологической функции текущим моментом времени и реализацией связанной с этим неопределённости согласования и конкретизации. Становятся известны значения параметров нижестоящих субъектов и назначенных ресурсов. Субъект при этом реализует регламент, предписываемый технологией, и выбирает значения параметров соответствующих управляющих воздействий. Неопределённость результата после шагов (e) и (f) будет ограничена только неизвестностью значений параметров неопределённости действия.

(i). По завершению действий характеристики неопределённости действия примут конкретное значение, и результат окажется сформированным полностью.

Введённые функции и параметры состояний СЭДа образуют структуру, представленную на рис. 14.

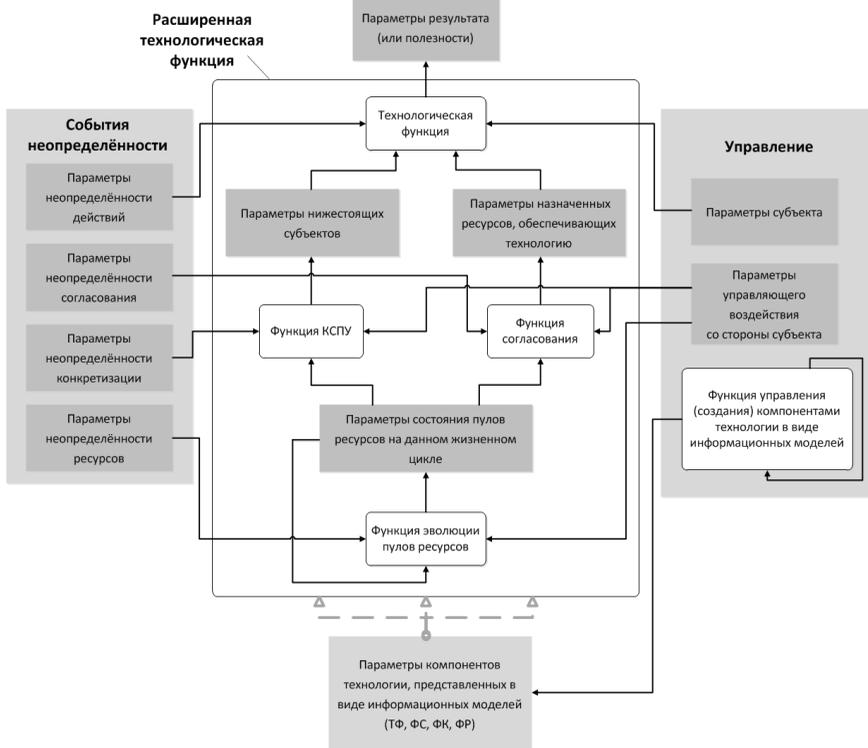


Рис. 14. Структура моделей проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС

Рис. 14 иллюстрирует, во-первых, влияние неопределённости (левая часть) и управления (правая часть) на поведение объекта управления, во-вторых, тезис о том, что детерминантами результата является технология (функции ФТ, ФС, ФК, ФР), согласованность жизненных циклов и значения характеристик неопределённости, в-третьих, что наибольшее влияние на ре-

зультативность и эффективность КД оказывает создание компонентов технологии в виде информационных моделей на этапе синтеза.

Выполнение компонентов управления в сопоставлении с фазами ЖЦ КД также может быть описано в компактной агрегированной форме, представленной на рис. 15, которая иллюстрирует общую схему реализации КД в следующем виде.

В ответ на внешнюю потребность создаётся технология, которая специфицируется в виде информационных моделей компонентов технологии - расширенной технологической функции.

Однажды созданная расширенная технологическая функция может многократно использоваться для реализации КД и получения результата и полезности. Это может происходить до тех пор, пока не сложатся условия, при которых она станет неадекватна, т.е. условия, выходящие за рамки её парадигмы. Возникновение таких условий в [1] определяется как наступление событий истинной неопределённости. Неадекватность технологии требует её замены, т.е. событие истинной неопределённости вызывает парадигмы технологии, фиксируемой в виде расширенно технологической функции (прекращение деятельности является частным случаем).

Таким образом, можно говорить о двух «контурах» реализации КД.

Повторение жизненного цикла КД при неизменной расширенной технологической функции рамках фиксированной технологии можно условно рассматривать как «внутренний контур». В рамках внутреннего контура реализуются компоненты управления, и происходят события измеримой неопределённости, но они учтены при разработке технологии.

Наступление события истинной неопределённости приводит к неадекватности расширенной технологической функции и необходимости её изменения путём реализации функции управления компонентами технологии.

После обновления информационной модели компонентов технологии, «замыкания внешнего контура», продолжается реализация КД при новой технологической парадигме во «внутреннем контуре».

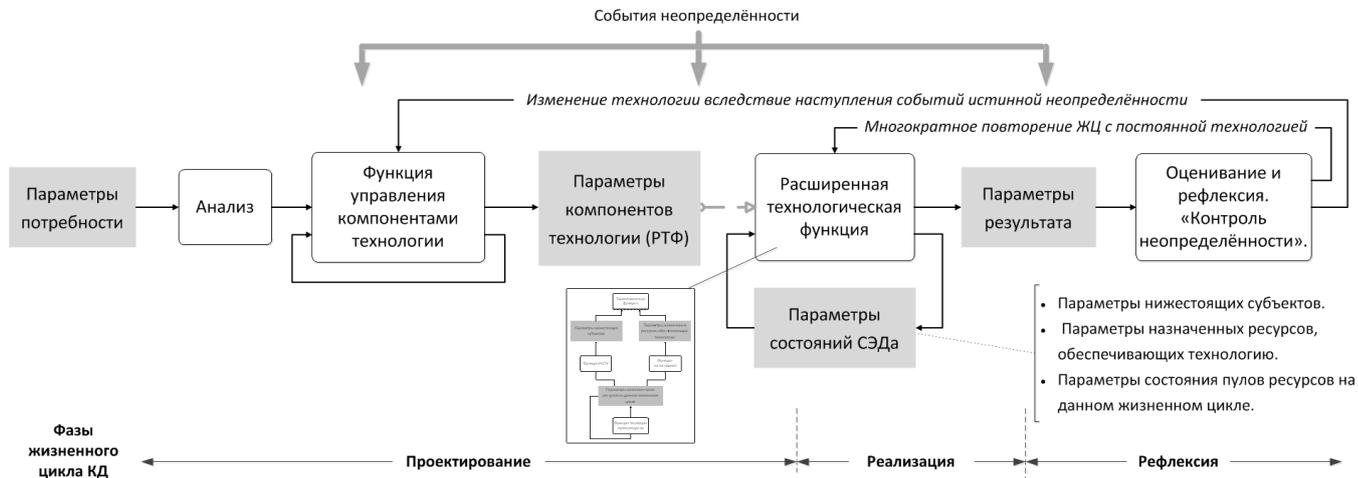


Рис. 15. Компактное агрегированное представление компонентов управления в сопоставлении с фазами ЖЦ КД

Приведенные структура моделей (рис. 14) и последовательность реализации (рис. 13 и 15) компонентов управления рассматриваемой постановки позволяют ставить и решать задачи оптимизации и управления ОТС.

6. Задачи оптимизации и управления ОТС

Рассмотрим задачи оптимизации и управления ОТС. Критерии оптимизации управления обычно строятся на основе показателей эффективности и результативности. В [1] (стр. 219) даны следующие определения:

Результативность реализации элемента комплексной деятельности, СЭДа – степень соответствия полученного результата целям элемента КД, СЭДа.

Эффективность реализации элемента комплексной деятельности, СЭДа – степень соотношения полученного результата и характеристик ресурсов, использованных в ходе реализации КД.

Данные определения позволяют задать количественные показатели в виде некоторых функций, отображающих множество значений характеристик результатов, субъектов и ресурсов КД на множества значений показателей результативности и эффективности (таблица 5).

Таблица 5. Функции результативности и эффективности

	Аргументы	Функция
ФР	1. Параметры результата 2. Целевые значения параметров результата	Показатель результативности
ФЭ	1. Параметры результата 2. Параметры субъекта 3. Параметры назначенных ресурсов, обеспечивающих технологию 4. Параметры нижестоящих субъектов	Показатель эффективности

Функция результативности (ФР) и функция эффективности (ФЭ) в свою очередь, позволяют строить на их основе критерии,

по которым можно сравнивать и выбирать (оптимизировать) различные варианты реализации элементов деятельности, варианты организации и управления. Для этого на значения одной из функций накладываются ограничения, а другая объявляется целевой, и по её значению сравниваются варианты управления реализацией элементов КД.

В ходе формулирования и формализации постановки проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС была зафиксирована обусловленность получения результата КД совокупностью факторов

- реализации компонентов управления (управление компонентами технологии в виде информационных моделей; управление пулами ресурсов, календарно-сетевое планирование и назначение ресурсов; согласование интересов субъектов)
- выполнения действия.

Рассмотрим эти факторы и ассоциированные с ними задачи управления.

При постановке задач управления важно ещё раз отметить особое место управления компонентами технологии в виде информационных моделей, которое выделяется и в определённом смысле «противостоит» остальным факторам. Для этого существует несколько оснований, неоднократно упомянутых выше: во-первых, в ходе реализации управления компонентами технологий создаются информационные модели остальных факторов, во-вторых, оно предшествует остальным и обуславливает их, в-третьих, оно содержит эвристики и отличается существенной спецификой в каждой конкретной предметной области в противоположность остальным факторам, для описания которых были введены функции ФП, ФК, ФС, ТФ и их композиция – расширенная технологическая функция РФ. Управление пулами ресурсов; календарно-сетевое планирование и назначение ресурсов; согласование интересов субъектов; выполнение действия образуют естественную композицию, что было отмечено при обсуждении расширенной технологической функции, будем условно называть эту композицию *«выполнением ЖЦ КД при фиксированной технологии»*, моделью данной

композиции является описанная выше расширенная технологическая функция.

Эвристичность и неформализуемость управления компонентами технологии не позволяет ставить задачу оптимального синтеза и, соответственно, задачу оптимизации управления ОТС в общем случае. Однако можно выделить, как минимум, две группы общезначимых формальных задач:

- Формирование и рассмотрение нескольких альтернативных вариантов технологии является желательным, а в некоторых случаях и требуемым условием синтеза. Соответственно возникает необходимость сравнения и выбор наилучшего варианта - задача *выбора варианта компонента технологии*.

- Любой синтез тесно связан с рефлексией – оцениванием и проверкой результатов синтеза. Поэтому необходимо рациональным образом организовывать оценивание и проверку вариантов технологии и в ходе синтеза, и в процессе её использования (рис. 15): проведение мысленных экспериментов, проверку вариантов технологии на практике и в ходе осуществления деятельности; адаптацию технологии к особенностям практики, в том числе к изменениям внешней среды; совершенствование технологии параллельно её использованию; оперативный контроль эффективности технологии; принятие решения о нецелесообразности дальнейшего использования технологии и необходимости её замены. Перечисленные и аналогичные задачи условно будем рассматривать как разновидности задачи *последовательного оценивания и оптимизации вариантов компонентов технологии*.

Решение задачи выбора варианта технологии может быть осуществлено на основании оценивания результативности и эффективности «реализации жизненного цикла элемента КД при фиксированной технологии». Для каждого сформированного варианта технологии функции ТФ, ФП, ФК, ФС определены и могут быть подставлены в функции эффективности (ФЭ) и результативности (ФР). Аргументами полученных таким образом сложных функций эффективности и результативности будут:

- параметры субъекта;

- параметры состояния пулов ресурсов;
- параметры управляющих воздействий со стороны субъекта в ходе согласования интересов, календарно-сетевое планирования и назначения ресурсов, управления пулами ресурсов;
- параметры неопределённости действий, конкретизации, согласования, ресурсов.

Тогда для сложных функций результативности и эффективности может быть решена задача оптимизации «реализации жизненного цикла элемента КД при фиксированной технологии» относительно параметров всех управляющих воздействий для каждого из сравниваемых вариантов технологии, что позволяет сделать выбор наилучшего варианта на основании полученных решений. Сам выбор варианта в таком случае становится тривиальным и не представляет интереса с точки зрения исследований.

Задача последовательного оценивания и оптимизации вариантов компонентов технологии также решается на основании задачи оптимизации расширенного действия.

Задача оптимизации «реализации жизненного цикла элемента КД при фиксированной технологии» представляет прикладной интерес, так как именно она позволяет найти оптимальное управление ОТС при заданных моделях компонентов технологии. Однако для получения прогностических и нормативных результатов эту задачу имеет смысл модернизировать. Дело в том, что «реализация жизненного цикла элемента КД при фиксированной технологии» является композицией разнодисциплинарных элементов: управление пулами ресурсов; календарно-сетевое планирование и назначение ресурсов; согласование интересов субъектов; выполнение действия принадлежат к различным областям науки и описываются различными математическими моделями. Разнодисциплинарный характер задачи не позволит использовать единые инструменты и, следовательно, не позволит получить аналитические результаты. Для проведения конструктивных исследований и получения аналитических результатов следует привести задачу к нескольким, каждая из которых будет монодисциплинарной. Такое приведение может быть выполнено фиксацией или оптимизацией всех управляю-

щих воздействий, кроме исследуемых в конкретном случае. Например, зафиксировав (или оптимизировав) значения параметров управляющих воздействий со стороны субъекта в ходе согласования интересов, календарно-сетевого планирования и назначения ресурсов, получим задачу управления пулами ресурсов, и т.д.

Таким образом, итоговый перечень базовых задач управления ОТС включает следующие основные задачи:

- Реализация жизненного цикла элемента КД (оптимизация композиции управления пулами ресурсов; календарно-сетевого планирования и назначения ресурсов; согласования интересов субъектов; выполнения действия).
- Управление компонентами технологий в виде информационных моделей (последовательное оценивание и оптимизация вариантов компонентов технологии).
- Календарно-сетевое планирование и назначение ресурсов;
- Согласование интересов субъектов с учетом технологий их деятельности.
- Управление пулами активных ресурсов.

7. Заключение

Рассмотрим сходства и отличия рассматриваемой постановки проблемы управления ОТС от подходов, используемых в смежных областях науки; выявим известные модели, пригодные для решения тех или иных задач, наметим направления разработок новых недостающих методов (результаты анализа в краткой форме сведены в таблицы 6 и 7).

Данная постановка проблемы управления ОТС в целом близка *теории активных систем* и *теории управления организационными системами* (ТУОС, см. [4, 12, 13] и другие работы в этой области), прежде всего, по определениям предметов: организационно-технической системы в рассматриваемой постановке и организационной системы (ОС) в ТУОС. Постановка «общей задачи управления» в ТУОС [13] описывает структуру управления в составе центра, агента и управляемого агентом объекта, рассматривая и одноразовый и многократно повторя-

ющийся режим функционирования ОС. Постановка ТУОС связывает с центром «два типа действий. Во-первых, задание механизма функционирования системы. Во-вторых, действия при заданном механизме, которые сводятся к выполнению заданных процедур по обработке информации и выработке управляющих параметров. Действия элементов нижнего уровня ... связаны с передачей в центр информации и выбором своих состояний» ([4], стр. 99). Составными частями механизма функционирования определяются «целевые функции системы (центра) и её элементов, ограничения механизма функционирования, закон планирования, принятая в системе последовательность действий центра и элементов в процессе функционирования, а также процедуры формирования данных, применяемые центром для получения информации об элементах» ([4], стр. 52).

Во всём этом постановка ТУОС в целом близка модели СЭДа. Однако в ТУОС постулируется неизменность и известность всем участникам технологии деятельности агента и управляемого им объекта (например, раздел 1.2 [13]), чем ТУОС принципиально отличается от рассматриваемой постановки.

Следствием этого является ещё одно существенное отличие ТУОС от данной постановки: если технология известна и задана, то нет необходимости рассматривать жизненный цикл деятельности, так как анализ издержек подготовительной/проектирования фазы ЖЦ не имеет смысла. Поэтому в ТУОС почти не рассматривается жизненный цикл деятельности. Можно говорить, что проблема управления в ТУОС фактически решается только в пределах этапа конкретизации и не включает задач создания информационных моделей компонентов технологии и управления пулами ресурсов (за исключением их выбора на этапе конкретизации). Следовательно, модели и методы ТУОС могут и должны быть использованы, но не обеспечивают в полной мере решение проблемы управления в постановке проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС.

Рассмотрим теперь, в каких областях науки исследуются отдельные задачи рассматриваемой постановки, и какие из известных результатов могут быть использованы для их решения.

Задача управления компонентами технологии в виде информационных моделей на описательном уровне решается методами и средствами системотехники (systems engineering, например, [2, 21, 26, 27]). Однако в данной формулировке задача является новой и потребует, прежде всего, адекватной формализации, а после - разработки специальных моделей и методов. На основании исследованных в МКД особенностей КД и процессов создания технологий можно говорить, что для решения задачи должны быть использованы методы и модели *теории вероятностей, случайных процессов, последовательного статистического анализа* и различных разделов *исследования операций*.

Задача управления пулами ресурсов относятся к области управления запасами и человеческими ресурсами. В силу значительного прикладного влияния таких задач на финансовые результаты фирм для их решения в различных постановках разработано большое количество моделей и методов.

Таблица 6. Связь проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС со смежными областями науки

	Смежные области	Специфические факторы
Проблема (в целом) согласованного управления ЖЦ ОТС в целом	ТУОС	Создание и изменение технологии деятельности. Жизненный цикл элементов деятельности.
Реализация жизненного цикла элемента КД	Исследование операций, ТУОС	Зависит от специфики ОТС.
Управления компонентами технологий	Исследование операций, ТУОС	Задача новая.
Календарно-сетевое планирование и назначение ресурсов	Исследование операций, ТУОС	Специфика отсутствует, могут быть использованы известные модели и методы.
Согласование интересов субъектов	ТУОС, теория иерархических игр, теория контрактов.	Технологические связи между агентами. Изменения технологии.
Управление путями ресурсов	Исследование операций, управление запасами и человеческими ресурсами, ТУОС.	Жизненный цикл ресурсов, в частности, сотрудников.

Таблица 7. Связь проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС с ТУОС

	Управление составом	Управление структурой	Институциональное управление	Мотивационное управление	Информационное управление
Реализация жизненного цикла элемента КД		+	+	+	
Управления компонентами технологий			+		+
Согласование интересов субъектов	+			+	
Управление пулами ресурсов		+	+	+	

Результаты широко представлены в литературе, начиная с основополагающих статей первой половины двадцатого века [25, 33] и включая современные университетские учебники, руководства и фундаментальные монографии, в частности [16, 23, 24]. В большом количестве статей изложены разнообразные варианты постановок. Например, в [31] рассматривается задача назначения сотрудников с помощью методов динамического программирования на множество информационно-технологических проектов с учетом сложности каждого проекта и наличия ресурсов соответствующей квалификации, а в [20] - выбор стратегий определения уровней неснижаемых и возобновляемых запасов и вопросы управления заказами новых партий запасов в условиях случайной потребности. Вместе с тем, специфика данной постановки, заключающаяся, прежде всего в необходимости анализа и оптимизации жизненного цикла ресурсов (в частности, сотрудников) требует разработок дополнительных решений.

Задачи календарно-сетевого планирования и назначения ресурсов исследуются и решаются методами и ТУОС, и различных разделов исследования операций [3, 4, 6, 11]. Данные задачи, являясь, безусловно, важными, не оказывают самостоятельного влияния на результат КД, так как в ходе конкретизации и назначения ресурсов фактически проявляются характеристики созданных ранее компонентов технологии (информационных моделей и пулов ресурсов), с учётом событий неопределённости (которые должны быть учтены) и согласования интересов субъектов (образующих отдельно рассматриваемую группу задач). Поэтому данные задачи в постановке проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС не отличаются какой-либо спецификой и аналогичны задачам, решаемым при управлении проектами. Следовательно, для их решения могут быть использованы известные модели и методы, а разработка новых не является необходимой.

Задача согласования интересов субъектов исследуется в ТУОС [13], а также, в той или иной степени, - в *теории кон-трактов* [19, 22, 29] и в *теории иерархических игр* [5, 7]. Однако данная задача в рамках постановки проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС отличается несколькими

специфическими особенностями, такими как необходимость рассмотрения технологических (причинно-следственных) связей между агентами, рассмотрения задачи в динамической и последовательной постановке в условиях изменяющихся технологий и внешней среды [ДК]. Эти особенности ограничивают возможность применения известных методов из упомянутых областей для решения задачи в рассматриваемой постановке и заставляют разрабатывать специфические [САС].

Таким образом, можно заключить, что, с одной стороны, постановка проблемы согласованного управления жизненными циклами ОТС тесно связана с теорией управления организационными системами и исследованием операций, с другой – отличается новизной, которая заключается:

- во-первых, в рассмотрении ключевых объектов предметной области (ОТС, элементов комплексной деятельности и их процессуальных компонентов) в течение всего их жизненного цикла;
- во-вторых, во включении в предмет исследования вопросов создания и изменение технологии деятельности, учитывающей измеримую и истинную неопределенность последней, а также вопросов согласования интересов субъектов ОТС с учетом технологий их деятельности.

Литература

- 1 БЕЛОВ М.В., НОВИКОВ Д.А. *Методология комплексной деятельности*. – М.: Ленанд, 2017. – 320 с.
- 2 БЕЛОВ М.В. *Системно-инженерные и экономические аспекты управления жизненным циклом // Управление большими системами*. – 2015. – Вып. 56. – С. 6–65.
- 3 БУРКОВ В.Н., ГОРГИДЗЕ И.А., ЛОВЕЦКИЙ С.Е. *Прикладные задачи теории графов*. – Тбилиси: ВЦ АН ГССР, 1974. – 232 с.
- 4 БУРКОВ В.Н., КОНДРАТЬЕВ В.В. *Механизмы функционирования организационных систем*. – М.: «Наука», 1981. – 384 с.
- 5 ГЕРМЕЙЕР Ю.Б. *Игры с противоположными интересами*. – М.: Наука, 1976. – 327 с.

- 6 ГОЛЕНКО-ГИНЗБУРГ Д.И. *Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками*. – Воронеж: «Научная книга», 2010. – 284 с.
- 7 ГОРЕЛИК В.А., ГОРЕЛОВ М.А., КОНОНЕНКО А.Ф. *Анализ конфликтных ситуаций в системах управления*. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
- 8 *ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь*.
- 9 *ГОСТ Р ИСО 9004-2010. Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества*.
- 10 ДОБРОХОТОВ А.Л. *Цель // Новая философская энциклопедия / Ин-т философии РАН; Нац. обществ.-науч. фонд; Предс. научно-ред. совета В. С. Стёпин, заместители предс.: А. А. Гусейнов, Г. Ю. Семигин, уч. секр. А. П. Огурцов. – 2-е изд., испр. и допол. – М.: Мысль, 2010*.
- 11 КОНОВАЛЬЧУК Е.В., НОВИКОВ Д.А. *Модели и методы оперативного управления проектами*. – М.: ИПУ РАН, 2004. – 63 с.
- 12 МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ: Учебное пособие / Под ред. Д.А. Новикова. – М.: УРСС, 2011. – 213 с.
- 13 НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами*. 3-е изд. – Физматлит, 2012. – 604 с.
- 14 ОЖЕГОВ С.И., ШВЕДОВА Н.Ю. *Толковый словарь русского языка: 80 000 слов и фразеологических выражений*. 4-е изд. – М.: Азбуковник, 1999. – 944 с.
- 15 ПРОХОРОВ А.М. (гл.ред.) *Большой энциклопедический словарь*. – М.: Советская энциклопедия, 1993. – 1632 с.
- 16 СЕМЕНЕНКО А.И., СЕРГЕЕВ В.И. *Логистика. Основы теории*. Учебник для вузов. – СПб.: Союз, 2003. – 544 с.
- 17 УШАКОВ Д.Н. *Толковый словарь русского языка*. – М.: Альфа-Принт, 2005. – 1216 с.
- 18 *Философский энциклопедический словарь*. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 840 с.
- 19 ЮДКЕВИЧ М.М., ПОДКОЛОЗИНА Е.А., РЯБИНИНА А.Ю. *Основы теории контрактов: модели и задачи*. – М.: ГУ ВШЭ, 2002. – 352 с.

- 20 ARTS J., BASTEN R., VAN HOUNTUM G.-J. *Repairable Stocking and Expediting in a Fluctuating Demand Environment: Optimal Policy and Heuristics* // *Operations Research* / Published online in *Articles in Advance*, 01 Jun 2016. – URL: [dx.doi.org/10.1287/opre.2016.1498](https://doi.org/10.1287/opre.2016.1498) (дата обращения: 01.10.2016).
- 21 BKCASE Editorial Board. *The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)*. – 2017. – URL: www.sebokwiki.org (дата обращения 01.04.2018).
- 22 BOLTON P., DEWATRIPONT M. *Contract Theory*. – Cambridge: MIT Press, 2005. – 740 p.
- 23 BLUMENFELD D. *Operations Research Calculations Handbook*. – CRC Press, 2001. — 216 p.
- 24 FLAMHOLTZ E. *Human resource accounting: advances in concepts, methods, and applications*. – N.-Y.: Springer Science+Business Media, 1999. – 390 p.
- 25 HARRIS F.W. "How Many Parts To Make At Once" *Factory* // *The Magazine of Management*. – 1913. – No. 10(2). – P. 135–136, 152.
- 26 *INCOSE Systems Engineering Handbook Version 3.2.2 – A Guide for Life Cycle Processes and Activities* / Ed. by C. Haskins. – San Diego: INCOSE, 2012. – 376 p.
- 27 *ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and Software Engineering. System Life Cycle Processes*.
- 28 KNIGHT F. *Risk, Uncertainty and Profit* // *Hart Schaffner and Marx Prize Essays*. – No. 31. – Boston and New York: Houghton Mifflin, 1921. – 381 p.
- 29 LAFFONT G., MARTIMORT D. *The Theory of Incentives: The Principal-Agent Model*. – Princeton: Princeton University Press, 2001. – 421 p.
- 30 REBOVICH G., WHITE B. *Enterprise Systems Engineering: Advances in the Theory and Practice*. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 459 p.
- 31 SILVA L.C., COSTA A.P.C.S. *Decision model for allocating human resources in information system projects* // *Int. Journal of Project Management*. – 2013. – Vol. 31. – P. 100–108.

- 32 WHITE B. *Fostering Intra-Organizational Communication of Enterprise Systems Engineering Practices*. MITRE Public Release Case No. 06-0351. National Defense Industrial Association, 9th Annual Systems Engineering Conference. San Diego, 2006. – 25 p. – URL: citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.388.771&rep=rep1&type=pdf.
- 33 WILSON R.H. *A Scientific Routine for Stock Control* // Harvard Business Review. – 1934. – No. 13. P. 116–128.

A PROBLEM OF ORCHESTRATED GOVERNING OF LIFECYCLES OF SOCIO-TECHNICAL SYSTEMS

Mikhail Belov, IBS Company, Moscow, Cand.Sc. (mbelov59@mail.ru).

Abstract: General problems of governing of socio-technical systems (STS) are analyzed in the context of harmonizing the interoperable life cycles of the corresponding structural elements of the activity. The system of these fixing connections between complex activity and STS, features of STS as a subject of management is formulated. Synthesis and concretization are defined as the means of solving the problem. It has been revealed that the problem of managing STS should be solved taking into account the needs to eliminate measurable uncertainty by including scenarios of reaction to measurable uncertainty in consideration, as well as allow for the possibility of multiple consecutive decisions due to the occurrence of true uncertainty events during the life cycles of elements of integrated activity. It is shown that the problem of managing an STS is solved, generally speaking, at all phases and stages of the life cycles of their activities. The creation of technology components (including management components) in the form of information models at the synthesis stage has a decisive influence on the effectiveness and efficiency of integrated activities. The final list of basic tasks of the management of the STS is defined.

Keywords: governing of socio-technical systems; complex activity; lifecycle; technology.

УДК 658.5 +334.012.23

ББК 65.050.2

DOI: 10.25728/ubs.2018.76.5

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Д.А. Новиковым.*

Поступила в редакцию 19.04.2018.

Опубликована 30.11.2018.

АГРЕССИЯ В МИРЕ АНИМАТОВ, ИЛИ О НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЗМАХ УПРАВЛЕНИЯ АГРЕССИВНЫМ ПОВЕДЕНИЕМ В ГРУППОВОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

Карпова И. П.¹

(Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва)

Карпов В. Э.²

(Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Московский физико-технический институт, Москва)

Обсуждаются возможные способы реализации агрессии как одного из механизмов формирования социального поведения в группах роботов. Агрессия рассматривается как способ разрешения конфликтов за ресурсы. В качестве основы использованы особенности агрессивного поведения эусоциальных насекомых (муравьев). Предлагается реактивная модель поведения, в которой агрессивный компонент интегрирован в потребностно-эмоциональную архитектуру системы управления анимата. Также рассматривается использование агрессивного компонента на феноменологическом уровне управления поведением. Проведены эксперименты по имитационному моделированию реализации доминирования в группе и решения задачи распределения кормовых участков. Показано, что добавление в систему управления параметра «агрессивность» обеспечивает разнообразие поведения анимата с учетом состояния среды, а также реализует групповое взаимодействие в естественной форме.

Ключевые слова: групповая робототехника, модели социального поведения, агрессивное поведение, эмоциональная система управления, задача фуражировки.

1. Введение

Данная работа выполнена в рамках фундаментальных исследований по применению моделей социального поведения как

¹ Ирина Петровна Карпова, к.т.н., доцент (karпова_ip@mail.ru).

² Валерий Эдуардович Карпов, к.т.н., доцент (karпов_ve@mail.ru).

единой методологической основы для организации управления в групповой робототехнике [14]. Базовый принцип групповой робототехники заключается в том, что при объединении усилий относительно простых роботов, обладающих ограниченными когнитивными способностями, возникает синергетический эффект, и группа может справиться с задачами, которые не по плечу отдельным роботам из этой группы.

Применение моделей социального поведения в групповой робототехнике относится к категории биоинспирированных подходов. Его основная идея заключается в том, что для появления эмерджентных свойств необходимо, чтобы группа роботов образовала социальное сообщество. Поэтому требуется изучить и реализовать механизмы и модели, необходимые для превращения группы роботов в такое сообщество (модели когезии, доминирования, контагиозного поведения и т.д.).

С точки зрения этологов одним из базовых механизмов, формирующих социальное поведение, является так называемое агонистическое, или агрессивное поведение [25]. Считается, что агрессивное поведение (АП) не является отдельным типом социального поведения, как, например, подражательное или родительское. Есть отдельные действия, которые особь выполняет при возникновении тех или иных ситуаций и которые сторонний наблюдатель может воспринимать как агрессивные. Но агрессия является неотъемлемой частью различных видов социального поведения, таких как брачное, родительское, территориальное, групповое (иерархическое) поведение. Исходя из этого, в рамках исследований моделей социального поведения в групповой робототехнике реализация этого механизма является необходимым условием создания моделей поведения более высокого уровня.

Существует ряд работ, в которых для решения некоторых задач робототехники применяются подходы, использующие понятие агрессивного поведения животных. Например, в [29] рассматривается задача борьбы за ресурсы и предлагается заменить бой между роботами для выяснения вопроса, кто из них сильнее, на демонстрацию агрессии (как у животных). Величина агрессии определяется тем, какой вклад в выполнение общей

задачи может внести данный робот. Робот подсчитывает количество времени, которое он потратил на достижение цели: если оно больше, чем у соперника, то соперник уступает (отступает назад в узком коридоре и дает пройти более агрессивному). Развитие этого подхода для команды роботов представлено в [45]. Там две группы роботов определяют, какая из них первая пройдет по узкому коридору, а какая уступит дорогу, в соответствии оценкой потерь, которые при этом понесет та или иная группа.

К сожалению, зачастую авторы подобного рода работ, используя понятие агрессии и даже иногда ссылаясь на работы этологов, делают это чисто формально, на уровне заимствования терминов.

С другой стороны, в области многоагентных систем также иногда используется понятие агрессии. Например, агрессия может рассматриваться как способ разрешения конфликтов, которые возникают при образовании коалиций [36]. А в [41] агент оценивает полезность ресурса, за который идет борьба, и потери, которые он может понести в борьбе за этот ресурс. Агент борется за ресурс, если его полезность превышает ожидаемые потери, в противном случае он отступает (точно так же, как это происходит у животных). Эта модель позволяет определить порог чувствительности (срабатывания) – уровень агрессивности, при котором агент принимает решение бороться за ресурс. Агрессивность агента в данной модели также играет роль отрицательной обратной связи: она повышается при проигрыше за ресурс и понижается, если агент выиграл. (Это необходимо для того чтобы ресурсы распределялись более равномерно.) Но подобный вариант учета агрессии не подходит для реализации, например, доминантного поведения, так как у животных уровень агрессивности доминирующей особи после победы повышается, что способствует ее закреплению в качестве лидера [19].

Еще один пример реализации агрессивного поведения на основе количественной модели рассмотрен в [18]. В этой модели уровень агрессии особи *A* определяется тремя параметрами: «накопленной агрессивностью», т.е. тем уровнем агрессивности, который есть у особи в каждый момент времени; наличием объ-

екта агрессии; наличием других особей своего вида (своей семьи). Накопленная агрессивность (как и у многих животных) коррелирует с близостью к центру «своей» территории и рассчитывается как величина, обратно пропорциональная расстоянию от своего «муравейника». Правило разрешения конфликтов основано на учете наличия поблизости (в зоне прямой видимости заданным радиусом X) других особей своего вида. Подсчитываются суммы уровней агрессивности «своих» среди соседей (A) и уровней агрессивности «чужих» среди соседей (A_n). Далее с вероятностью $p = A/(A + A_n)$ особь побеждает в конфликте, а с вероятностью $(1 - p)$ – проигрывает. Данная модель АП учитывает только два фактора – близость к центру «своей» территории и численность соседей – и может быть использована только для решения частной задачи: разрешения территориальных конфликтов между агентами (роботами) на основе локального взаимодействия. В некотором смысле эта работа относится к категории макромоделей, так как описывает поведение не отдельного агента, а группы.

Нас же интересуют конструктивные, биологически обоснованные схемы (модели) агрессивного поведения, которые можно применить к решению различных задач групповой робототехники. Под конструктивностью модели понимается возможность ее использования в системе управления робота. Используя термин «агрессия», «агрессивное поведение», мы имеем в виду интерпретацию действий особи сторонним наблюдателем. Это позволит нам естественным образом описывать поведенческие аспекты функционирования робота (анимата).

Цель работы – определить компоненты системы управления (СУ), влияющие на поведение анимата таким образом, что это поведение расценивается как агрессивное, а также, в конечном итоге, определение способов управления поведением с точки зрения его агрессивности.

Структура статьи такова. В разделе 2 обсуждаются определения агрессивного поведения. Затем рассматриваются основные способы проявления агрессии у животных и особенности агрессивного поведения муравьев как эусоциальных животных. В разделе 3 описывается архитектура системы управления ани-

мата, в которой эмоции являются основой для управления поведением анимата, определяя общую оценку текущей ситуации. Раздел 4 содержит описание экспериментов по имитационному моделированию, поставленных с целью выявить изменение поведения анимата в зависимости от величины текущего уровня его агрессивности. В разделе 5 определяются базовые механизмы, необходимые для воспроизведения такого наблюдаемого в природе феномена, как разведка и распределение муравьев по участкам. Оказывается, что такими механизмами являются доминирование (как результат агрессивных действий) и память. В Заключении обобщается изложенный материал и определяются направления дальнейших исследований.

2. Агрессивное поведение

В соответствии с биологическим словарем [3] агонистическое поведение у животных (от греч. *agonistikos* – способный к борьбе, воинственный) – это сложный комплекс действий, наблюдаемый во время конфликтов между особями одного вида и включающий взаимные угрозы, нападения на соперника, бегство от него, преследования и демонстрации подчинения. Агрессивное поведение направлено в первую очередь на особь того же вида как на соперника в борьбе за ресурсы (за территорию, за самку и т.п.), хотя встречаются и исключения (например, борьба между птицами разных видов за удобное дупло).

Агрессивное поведение (АП) участвует в формировании многих видов социального поведения, в частности [20, 25, 42]:

1. Поддержание территориального гомеостаза с целью обеспечения жизненного пространства, необходимого для пропитания особи или группы особей.

2. Брачное поведение (поединки между самцами, способствующие отбору более сильных и выносливых животных для продолжения рода).

3. Забота о потомстве, включающая защиту потомства от любых приближающихся к нему животных, в том числе особей своего вида.

4. Формирование группы с иерархическими отношениями, которые обеспечивают ее управляемость – иерархическую структуру взаимного подчинения.

5. Поддержание группового (стаиногo, семейного) гомеостаза: в группу не принимают чужаков – особей из других групп.

Агрессия имеет настолько разнообразные причины возникновения и способы проявления, что существует множество подходов к ее дефиниции. Мы ограничимся определениями АП применительно к животным. Представители этологического подхода рассматривают агрессию у животных как естественную, эволюционно отработанную и адаптивную форму поведения, которая позволяет животным существовать в условиях ограниченных ресурсов и сопутствует конкуренции за пищу, за партнера при спаривании, за место обитания [19]. К сожалению, даже в рамках этого подхода нет общепринятого определения агрессии. К. Лоренц в своей широко известной книге «Агрессия» фактически обходится вообще без определения, так как сложно считать таковым фразу: «В книге речь идет об агрессии, т.е. об инстинкте борьбы, направленном против собратьев по виду». Лоренц ограничивается феноменологией этого явления. Аналогичным образом поступает другой известный исследователь Н. Тинберген, который в книге «Социальное поведение животных» много пишет об агрессии и определяет ее как поведение, проявляющееся в результате одновременного возникновения у особи двух противоположных побуждений – к нападению и к бегству. Р. Хайнд в своем классическом труде «Поведение животных» приводит такое определение: «Адресованное другой особи поведение, которое может привести к нанесению повреждений и часто связано с установлением определенного иерархического статуса, установлением превосходства, получением доступа к определенному объекту или права на какую-то территорию» [27].

Наиболее конструктивным с нашей точки зрения является подход, при котором агрессия рассматривается «как следствие конфликта интересов особи, пары или группы» [2]. Это позволяет использовать понятие агрессии для разрешения конфликтов между особями или группами особей (аниматов) путем

непосредственного воздействия на объект-причину конфликта. (Конфликт – несоответствие требуемого (целевого) состояния текущему.)

В целом агрессивное поведение у животных выполняет видосохраняющую функцию. Мы не будем подробно описывать, как именно с помощью агрессии животные устанавливают границы своей территории или иерархию в группе (более подробно это изложено, например, в [38]). Но основные механизмы агрессивного поведения необходимо рассмотреть более детально для того, чтобы взять их за основу при реализации отдельных моделей социального поведения в групповой робототехнике.

Обычно агрессия возникает при появлении соперника. Мы рассматриваем агрессию в отношении соперника – особи своего вида, так как именно этот вид агрессии участвует в формировании социального поведения. Агрессивное поведение как процесс включает в себя ряд этапов: 1) демонстрация угрозы; 2) схватка; 3) умиротворение. Сначала при возникновении конфликта животное находится в состоянии страха (более или менее выраженном) – тут-то и реализуется знаковая форма конфронтации: ритуальная демонстрация ранга, размеров, силы и прочего. Затем, оценив ситуацию, животное либо убегает (возобладал страх), либо вступает в схватку (ярость пересилила страх). Наконец, после окончания физической, силовой стадии, победившее животное умиротворяется, а потерпевшее поражение – примиряется (смиряется) с ним.

При этом внутривидовая агрессия очень редко переходит в фазу поединка, а чаще ограничивается демонстрацией угроз. Демонстрации угрозы имеют строго специфическую для вида форму, из-за которой их принято называть фиксированными комплексами действий (ФКД, [25]). Ритуализацию можно объяснить тем, что поединок может приводить к ранению или гибели более слабой особи, что отрицательно скажется на выживании вида в целом. Поэтому в ходе эволюции развивались механизмы, подавляющие АП и предотвращающие переход к открытому поединку. Агрессивное поведение подавляется (тормозится) либо устранением причины (соперника, помехи и т.п.), либо демонстрацией подчинения со стороны другой особи.

При изучении агрессии для применения в рамках групповой робототехники мы в первую очередь ориентируемся на поведение муравьев как представителей эусоциальных насекомых. АП является частью механизма, обеспечивающего выделение общины насекомых как единого целого [8]. Объектами агрессивных действий являются особи других видов, конспецифичные особи из других общин и члены собственной общины. Проявление агрессивного поведения у муравьев можно разделить на два класса [7, 8]:

1) внутрисемейная агрессия (стимулирующие воздействия; формирование субординационных структур, конкурентная борьба между рабочими одной семьи; контроль состава семьи);

2) внесемейная агрессия (охрана, защита расплода и репродуктивных особей, других рабочих, гнезда, кормового участка).

К особенностям агрессивности у муравьев (и других общественных насекомых) относится возрастание индивидуальной агрессивности особи с возрастом последней. При этом агрессивность и активность собранных в группу наиболее агрессивных рабочих особей существенно снижается, а группирование неагрессивных муравьев ведет к возрастанию их общей активности и появлению среди них особей с агрессивным поведением [8]. Процентное распределение муравьев по степени агрессивности оказывается в конечном итоге одинаковым независимо от вариантов перегруппировки и равным таковому при случайном составе групп.

При формировании субординационных структур, основанных на взаимодействии индивидов, наблюдается выраженная индивидуальная агрессивность муравьев. В определенных пределах она может оцениваться как один из механизмов стабильности общины. (Избыточная агрессивность может приобретать неадаптивный характер). Внутри гнезда АП наблюдается при взаимодействии старых рабочих или рабочих с самками. Расплод и молодые рабочие, наоборот, ведут себя лояльно и стимулируют развитие лояльного отношения индивидов друг к другу как более распространенного типа отношения внутри общины.

Интересно, что физиологическое состояние и психические наклонности муравьев влияют на их специализацию: более ак-

тивные и любознательные рабочие муравьи становятся разведчиками; менее активные – фуражирами или сборщиками пади. Агрессивность муравьев увеличивается с возрастом, и самые агрессивные и опытные муравьи (в частности, у рода *Формика*) находятся на куполе муравейника и являются наблюдателями. В координации действий индивидов основную роль играют имитационное поведение или стимуляция «подобного подобным». Например, при возникновении угрозы муравьи-наблюдатели принимают агрессивную позу, атакуют. Другие муравьи реагируют на эти характерные движения и позы (ФКД) и почти мгновенно переключаются на оборону, что подтверждает тезис о целостной реакции каждой особи на воспринимаемый сигнал. При этом в социуме с глубокой дифференциацией целостная реакция проявляется уже только на уровне группы особей или всего сообщества [8].

Также оседлые муравьи с помощью агрессивного поведения защищают свою территорию (точнее, кормовой участок) от представителей других гнезд и других видов муравьев. Определенную роль при этом играет численность муравьев. Встретившись на кормовом участке, одиночные охотники, зная, что поблизости никого из своих нет, предпочитают мирно разойтись. Но достаточно кому-нибудь из неосторожных фуражиров увлечься и оказаться слишком близко от чужого гнезда, где численность хозяев уже достаточно велика, его сразу же атакуют, и если он не спасется бегством, то будет уничтожен [7].

Субординационные структуры формируются в тех ситуациях, когда необходима координация действий группы муравьев, например, при организации фуражировки. Если признанный лидер группы существует, то подчиненные особи просто подражают его действиям. Если же лидера нет, то вопрос о лидерстве решается прямой конкуренцией между несколькими наиболее активными фуражирами. Впоследствии лидерство победившей особи признается другими фуражирами. Вообще, всякое сообщество со сложившейся системой субординации само активно поддерживает уже имеющуюся структуру, и инициатива в этом в первую очередь принадлежит подчиненным особям [4].

Роль турниров у муравьев при установлении лидерства играют попытки переноса одной особью другой. Это своеобразная ритуализация форм борьбы за лидерство, отражающая общую тенденцию последовательного смягчения форм внутривидовых отношений и перехода от агрессии и конкуренции к кооперации, взаимопомощи и взаимной стимуляции. Вообще все формы поведенческого взаимодействия конспецифичных особей в сообществе носят конвенциональный характер, т.е. основаны на соблюдении ими определенных правил поведения [8].

Следовательно, у муравьев агрессия также участвует в формировании рассмотренных выше видов социального поведения. Но часто выделить агрессивные действия как таковые невозможно, так как одни и те же действия в разных ситуациях могут рассматриваться как проявление агрессии, а в других – нет. Считать или нет то или иное действие агрессивным – определяет наблюдатель с учетом контекста и обстоятельств, при которых это происходит.

Далее рассмотрим, как вышесказанное может быть отражено в структуре системы управления анимата, и определим компоненты системы управления, влияющие на поведение анимата таким образом, чтобы это поведение могло расцениваться как агрессивное.

3. Обобщенная модель агрессивного поведения

В процессе функционирования анимат оценивает свое собственное состояние и состояние окружающей среды и осуществляет некоторые действия, которые определяются его потребностями и возможностями.

Согласно классической парадигме, поведение анимата можно представить как последовательность «состояние – действие – состояние – действие...». Пусть имеется целевое (S_G) и текущее (S_C) состояние. Переход анимата из состояния в состояние осуществляется с помощью действия (комплекса действий, запуска поведенческой процедуры и проч.) *Act*:

$$(1) S_c \xrightarrow{Act} S_G.$$

Определим, что мы будем понимать под агрессивными действиями. Во-первых, для проявления агрессии необходимо наличие некоторого целевого объекта O^A , на которое осуществляется воздействие. (Зачастую в отсутствие объекта – цели агрессии – выбирается некоторый подходящий (случайный) объект.) Во-вторых, будем полагать, что цель оказания воздействия – устранение этого объекта. Это можно записать так:

$$(2) S_G = S_c \setminus O^A.$$

Устранение объекта агрессии подавляет агрессивное поведение. Устранение может заключаться как в удалении O^A из сцены, так и в изменении поведения O^A , которое выражается в демонстрации подчинения со стороны O^A .

Если *Act* (1) – это действие по устранению причины несоответствия текущего состояния целевому путем оказания на объект деструктивного воздействия, то такое действие будем называть *агрессивным*. Другими словами, агрессивное поведение осуществляет преобразование текущего состояния так, чтобы устранить причину несоответствия.

3.1. ЭМОЦИИ КАК МЕХАНИЗМ РЕГУЛЯЦИИ ПОВЕДЕНИЯ

Мы рассматриваем агрессивное поведение как способ разрешения конфликтов. Под конфликтом понимается наиболее радикальный острый способ разрешения значимых противоречий, возникающих в процессе взаимодействия, заключающийся в противодействии субъектов конфликта и обычно сопровождающийся негативными эмоциями [1]. Следовательно, появление *негативной эмоции* может служить признаком возникновения конфликта и внутренней причиной проявления агрессии.

Эмоции являются одним из основных механизмов регуляции поведения, отвечающим за контрастирование сенсорного восприятия и за стабилизацию поведения. Эти функции характерны не только для живых организмов, но применимы также к техническим системам. В работе [35] была предложена архитектура системы управления анимата, в которой эмоции являются основой для управления поведением анимата, определяя общую

оценку текущей ситуации. Этот подход базируется на потребностно-информационной теории эмоций П.В. Симонова [22].

Потребность – это та нужда, которую время от времени испытывает организм и которую он стремится устранить через поведение [5]. Потребности живого организма можно разделить на три группы:

1) биологические (витальные): метаболические потребности (в кислороде, воде, пище и т.д.); потребность в отдыхе и сне; потребность в самосохранении и т.п.

2) зоосоциальные: потребности находиться в окружении представителей своего вида (семьи, популяции); потребности выполнять видотипичные поведенческие действия; потребности занимать в группе определенное положение;

3) «идеальные» (так называемые потребности саморазвития [24]): потребность в получении новой информации; потребность преодоления препятствий, открытая И.П. Павловым и названная им рефлексом свободы.

Биологические (или витальные) потребности направлены на сохранение жизни индивида. У большинства животных они имеют более высокий приоритет по сравнению с другими потребностями.

Зоосоциальные потребности, так же как и витальные, развиваются как результат выраженного изменения внутреннего равновесного состояния животного организма. Материальной основой их возникновения служат два фактора: изменение возбудимости (электрического состояния) определенных групп нейронов (нервных центров) и изменение гормонального статуса организма. Зоосоциальные потребности обеспечивают стабилизацию внутреннего состояния отдельного представителя группы и стабилизируют группу в целом [21]. Зоосоциальные потребности реализуются через взаимодействие с другими особями своего вида во время полового, родительского, территориального поведения.

К идеальным потребностям в первую очередь относят потребность в получении новой информации, которая лежит в основе ориентировочно-исследовательского поведения. (Потребность анимата в получении новой информации можно назвать

«любопытством» в некотором метафорическом смысле, вводя ее для большей наглядности примеров.)

Что же касается муравьев, то у них (как и у других эусоциальных насекомых) над индивидуальными потребностями превалируют потребности семьи (муравейника). Действия муравья определяются, в конечном счете, общественной необходимостью, любой вид его деятельности носит ярко выраженный социальный характер. Семья (точнее, ее потребности) побуждают особь к действию, причем обычно в самой общей форме (нужна пища, холодно и т. п.). Задача и место ее выполнения конкретизируются при индивидуальном взаимодействии муравья с другими членами семьи в процессе их жизнедеятельности.

В соответствии с теорией П.В. Симонова предполагается, что эмоции являются оценкой текущей потребности (ее качества и ценности) и возможности ее удовлетворения. Мозг оценивает эту возможность на основе генетической предрасположенности и ранее полученного индивидуального жизненного опыта. В общем виде отношение этих факторов описывается формулой

$$(3) \quad E = f(N, p(I_{need}, I_{has})),$$

где E – эмоция, ее величина, качество и знак; N – сила и качество текущей необходимости; $p(I_{need}, I_{has})$ – оценка возможности удовлетворить потребность на базе врожденного и полученного жизненного опыта; I_{need} – информация о способе, необходимом для удовлетворения потребности; I_{has} – информация об имеющихся средствах, ресурсах и времени, которые субъект действительно имеет в настоящем. Это главным образом качественная формула, иллюстрирующая принцип формирования положительных и отрицательных эмоций от различных воздействий.

Здесь следует сделать важное замечание. Разумеется, существует множество теорий эмоций: от психоэволюционной теории Плутчика до попыток введения так называемой алгебры эмоций [26]. Да и сам Симонов говорил о существовании базисного фонда бесконечно разнообразной эмоциональной жизни человека, выделяя четыре эмоциональных состояния: гнев, страх, удовольствие и отвращение [23]. Серьезный обзор и критический анализ теорий эмоций, в том числе и теории Симонова, приведен в работе [11]. Однако дело в том, что в основном

рассуждения об эмоциях, согласно тому же П.В. Симонову, носят в основном абстрактно-описательный характер и являются прежде всего антропоцентрическими. Мы же здесь говорим о том, что с конструктивной точки зрения физиологический эмоциональный уровень поведения анимата – будучи, естественно, примитивным по сравнению с уровнем высших позвоночных – хорошо описывается именно в терминах информационно-потребностной теории Симонова.

Мы можем объяснить выражение (3) следующим образом: индивид оценивает свои текущие потребности или то, что он должен сделать (поесть, найти еду, уклониться от препятствия, убежать и т.д.). Затем он оценивает индивидуальные возможности удовлетворения этих потребностей. Разница между потребностями и возможностями определяет эмоциональную оценку текущей ситуации. Если особь имеет некоторые потребности и при этом возможности для их удовлетворения достаточны, то она положительно оценивает ситуацию. В противном случае ее эмоции негативны. Подчеркнем, что в отличие от чувств эмоции относятся к ситуации, а не к объекту. Чувства направлены на некоторый абстрактный или реальный объект (любить что-либо, бояться чего-либо и т.д.). Напротив, эмоции, такие как удовольствие, удивление или страх, отражают оценку ситуации. Поэтому при наличии негативных эмоций даже в отсутствие противника особь может совершать агрессивные действия, но тогда они направлены на случайный объект, который находится поблизости и на котором можно «сорвать зло» [20].

В принципе, введения эмоциональной составляющей достаточно, чтобы реализовать простые формы поведения анимата. При этом разнообразие поведения во многом может определяться значениями параметров такой системы управления. Но если мы говорим о моделировании социального поведения и опираемся при этом на модели поведения животных, то надо учитывать, что в реальной природе поведение животных характеризуется большим разнообразием. Например, при наличии одинаковых уровней потребностей разные особи в одной и той же ситуации будут действовать по-разному: одна нападет, другая убежит. В первую очередь это зависит от уровня агрессивности:

более высокий уровень агрессивности способствует тому, что особь чаще выбирает нападение, чем бегство/подчинение. И даже одна и та же особь в одинаковых ситуациях может вести себя по-разному. У нее ничего не изменилось, ни потребности, ни сила, но она убегает вместо того, чтобы нападать, и наоборот, в зависимости от того, какой у нее уровень агрессивности. Таким образом, уровень агрессивности непосредственно влияет на поведение особи.

Итак, мы полагаем, что в общем случае поведение, которое может интерпретироваться как агрессивное, возникает при наличии сильных отрицательных эмоций, связанных с нереализованностью тех или иных потребностей особи (анимата). В системе управления анимата состояние каждого блока действия характеризуется своей частной эмоцией E_i . Условие выбора действия определяется эмоциональным состоянием анимата:

$$(4) C_a = C_a(E), E = \{E_i\}.$$

Рассмотрим эту систему управления на частном примере.

3.2. ПРИМЕР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АНИМАТА

Пусть имеется анимат со следующими потребности и сенсорными возможностями:

1. Потребности: пища, вода, самосохранение, отдых, любопытство.

2. Сенсоры: пища, вода, свет, чужак, усталость*, голод*, жажда* (* – три последних являются виртуальными сенсорами и отражают внутреннее состояние анимата).

Правила поведения анимата: он избегает света и чужаков. «Чужак» – это представитель одного и того же с аниматом вида, но из другого «гнезда» (другой группы). При этом в отсутствие опасных факторов, а также чувств усталости, голода и жажды, анимат «гуляет», т.е. исследует территорию, реализуя потребность в получении новой информации. Рис. 1 иллюстрирует схему управляющей системы такого анимата (пунктиром здесь обозначены отрицательные связи, т.е. отсутствие пищи, воды и т.д.).

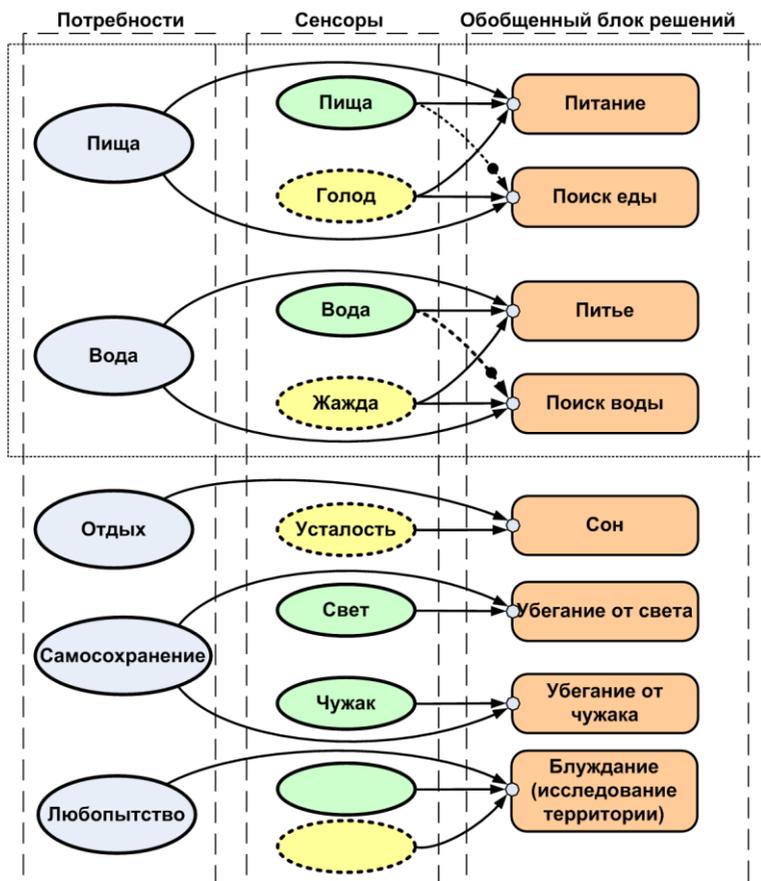


Рис. 1. Схема управления анимата

Мы не будем перегружать схему поведения дополнительными связями, указывающими, например, что любопытство заставляет анимата блуждать (т.е. исследовать территорию) тогда, когда анимат не голоден, не устал, не видит опасность и т.п. Здесь также не отражены вентили и обратные связи. В реальной схеме присутствуют так называемые вентильные элементы, соответствующие каждому сенсору. Они являются элементами контура положительной обратной связи, идущей от выходных элементов (действий). Эти контуры реализуют эмоциональный

компонент СУ. Положительные обратные связи отвечают за стабилизацию работы системы, контрастирование восприятия, реализуют эффект кратковременной памяти и прочие феномены и функции, присущие эмоциям (более подробно см. [12, 13]). Поэтому надо иметь в виду, что фактически на месте каждого сенсора находится сенсорно-вентильная пара, которая реализует частную эмоцию.

Формальное описание системы управления вплоть до представления ее в виде структурной схемы приведено в монографии [16]. Однако следует понимать, что задача приведенной выше схемы – не собственно анализ архитектуры системы и особенностей поведения анимата, а выделение основных интересующих нас компонентов – потребностей, сенсорики и поведенческих процедур.

В качестве универсального средства для реализации самих поведенческих процедур используются конечные автоматы [28]. Каждый автомат реализует свой ФКД, и система управления анимата разделена на два уровня: уровень управления поведением и уровень реализации ФКД.

Автоматы, реализующие ФКД, являются параметризуемыми. Это означает, что нет отдельных автоматов для поиска, например, еды, воды и пр. Искомый объект задается как параметр для некоторого обобщенного автомата, реализующего процедуру поиска. Это удобно как минимум с технической точки зрения.

Потребности в пище и воде, а также наличие соответствующих сенсоров и поведенческих блоков введено для того, чтобы подчеркнуть наличие одинаковых структур в системе управления, отличающихся лишь одним параметром – «пища» и «вода». То же самое касается и смысла введения боязни аниматом «чужаков» и «света».

Очевидно, что блоки схемы, связанные с «пищей» и «водой», являются в некотором смысле однотипными, имеющими возможность определенной унификации. Выше мы уже говорили о таком аспекте унификации, как использование обобщенных автоматов. Здесь также имеется возможность введения некоторого обобщения, при котором вводится действие потребления,

направленное на «пищу» и «воду» (это – параметры действия). Или действие поиска, определяемое заданной целью – той же «пищей» или «водой».

Обобщение приводит к тому, что у процедур потребления и поиска появляются несколько точек входа, задающих параметры процедур. Точки входа в общем случае представляют собой тройки типа

$$(5) P = (П, У, О),$$

где $П$ – потребность, $У$ – условие, $О$ – объект, на который направлено действие.

Например, для процедуры «Потребление» точка входа, связанная с пищей, задается наличием потребности в пище ($П$), условием в виде ощущения голода ($У$) и объектом потребления – собственно пищей ($О$). На рис. 2 представлена схема организации таких обобщенных процедур (пунктиром также обозначены отрицательные связи, т.е. отсутствие пищи, воды и т.д.).

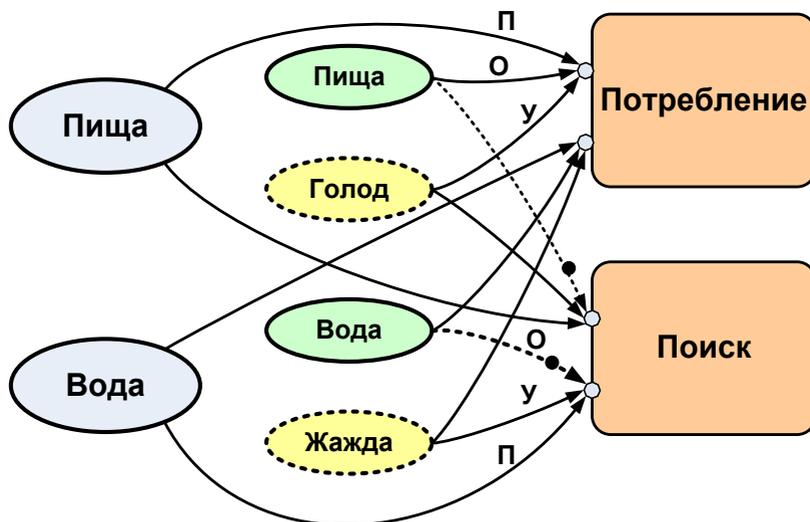


Рис. 2. Обобщенные процедуры потребления и поиска

Здесь следует отметить, что возможно дальнейшее обобщение. Например, вводятся абстрактные сущности, называемые «Потребность», «Целевой объект» (то, на что направлено действие) и «Условие», активируемые уже конкретными потребностями, значениями сенсоров и т.п. Однако все это относится уже к уровню непосредственной реализации поведения, на котором могут быть реализованы поведенческие реакции в виде тех же конечных автоматов. Даже схема обобщения на рис. 2 не является удобной для решения нашей основной задачи – определения агрессивных компонентов поведения.

Дело в том, что крайне важно определить явные внутренние конфликты при выборе и совершении тех или иных действий. Эти внутренние конфликты, связанные с невозможностью удовлетворения тех или иных потребностей, определяют эмоциональное состояние анимата. При этом значения частных эмоций, связанных с теми или иными вентилями действий, задают факторы инициации агрессивного поведения. В этом причина того, что для понимания сути вопроса более удобным (хотя и более громоздким) является представление явной схемы поведения, изображенной на рис. 1.

3.3. АГРЕССИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ПОВЕДЕНИЯ

Все рассуждения, приведенные в этом разделе, основаны на следующем постулате. Когда мы говорим об *агрессии* или *агрессивном поведении*, мы имеем в виду те действия, которые сторонним наблюдателем могут быть расценены как агрессивные в данном контексте и при обстоятельствах, при которых это происходит. С учетом сложившейся практики применения эти термины удобно использовать для описания отдельных действий (ФКД), являющихся частью некоторых моделей поведения.

Будем полагать, что анимат умеет выполнять некоторые действия, реализующие тот или иной аспект поведения, которое принято называть агрессивным: демонстрацию, угрозу, непосредственно нападение и т.п. Механизм реализации этих действий несущественен.

Выше было сказано, что всякое действие определяется тройкой (*Потребность, Условие, Объект*) (4). В зависимости от того, каким образом определяются компоненты этой тройки, мы получаем различные схемы поведения.

Условие запуска любого действия – наличие отрицательных эмоций, связанных с нереализованностью тех или иных потребностей. Если бы мы говорили о реализации агрессивного поведения в «чистом виде», то это можно сделать, например, с помощью некоторой функции, зависящей от самых разных факторов. В простейшем случае она может быть константой, описывающей склонность анимата к агрессии (к активным действиям в случае возникновения конфликта). Или являться функцией, зависящей от расстояния до гнезда, и в этом случае мы получаем проявления феномена «территориальной агрессии» – нападение на чужака с целью изгнания его с территории, прилегающей к гнезду.

Важным вопросом является выбор объекта агрессии, т.е. того, на кого эти действия направлены. Например, объектом агрессии может стать тот объект, с которым связано действие, характеризующееся минимальной (максимальной отрицательной) эмоцией:

$$(6) \quad O_{aep} = O_i; E_i = \min E.$$

Напомним, что только агрессия, направленная на представителей одного с особью вида, участвует в регуляции социального поведения (см., например, [10]). Поэтому из всех объектов, вызывающих отрицательные эмоции, выбираются только «свои», т.е. другие аниматы. В качестве объекта агрессии выбирается тот, который вызывает наибольшие отрицательные эмоции.

На нижнем, рефлекторном уровне можно рассматривать реакцию особи на появление «чужака», т.е. особи из другой группы. «Чужак» в конечном итоге всегда вызывает отрицательную эмоцию, и действия в отношении «чужака» можно расценивать как агрессивное поведение. При этом особь испытывает противоположные побуждения: потребность в защите гнезда или охране кормового участка велит напасть на «чужака», а потребность в самосохранении – убежать от него. В том и в другом

случае действия особи направлены на устранение причины отрицательных эмоций: устранении «чужака» путем его изгнания или самоустранении путем бегства.

Теперь рассмотрим ситуацию, при которой у особи возникает конфликт с другим представителем своей группы. Например, у особи есть потребность двигаться вперед, а на пути стоит другая особь той же группы. Естественно, это мешает особи удовлетворять свою потребность и вызывает отрицательную эмоцию. При этом у особи есть минимум два способа разрешить этот конфликт: обойти препятствие или оттолкнуть его. Второй способ может быть расценен как агрессивное поведение, потому что фактически является атакой на особь своей группы.

Совершенно другая ситуация возникает тогда, когда агрессия проявляется как результат подражательного поведения. Особь, наблюдая действия другой особи своего вида, в том числе агрессивные, отождествляет себя с этой особью и начинает совершать те же действия. (Более подробно это рассмотрено в [15]). Здесь играет роль соотнесение особью своего субъективного Я с другой особью своего вида, позволяющее особи воспринять ее состояние как свое, испытывая при этом те же отрицательные эмоции. Следствием этого будут действия, которые можно интерпретировать как агрессивные: принятие угрожающей позы, сближение и нападение. Выбор объекта агрессии при этом происходит в соответствии с некоторой общей схемой поведения, определяющей приоритетность разных объектов: в первую очередь таким объектом будет «чужак», если он есть (если их несколько, то ближайший или произвольный); затем – сам агрессор. У муравьев аналогичное подражательное поведение может возникать как реакция на запах муравьиной кислоты: когда они ощущают этот запах, они воспринимают его как сигнал к атакующим действиям, выстреливая кислоту во все движущиеся объекты, которые попадают в поле зрения.

Рассмотрим подробнее схемы поведения, в которых в явном виде принято выделять агрессивный компонент: территориальное поведение (охрана кормового участка), доминирование и самосохранение (рис. 3, рис. 4). Если не включать в эти схемы элемент агрессии, то поведение анимата будет определяться

только силой потребности. Например, если потребность в доминировании больше потребности в самосохранении, то анимат будет нападать на соперника, если меньше – убежать.

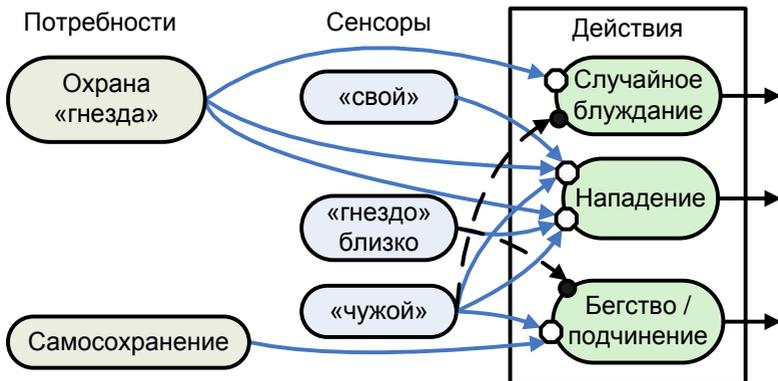


Рис. 3. Схема охраны территории (кормовых участков)

Здесь и далее белым кругом обозначены возбуждающие, а черным – тормозящие входы, т.е. входы, увеличивающие и уменьшающие выходную активность элемента соответственно.

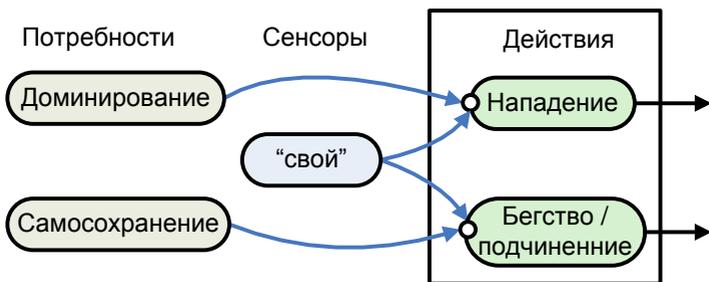


Рис. 4. Схема доминирования

Включение в схему управления анимата агрессивного компонента позволяет более компактно описывать поведенческие процедуры, вводя в них некий элемент унификации. Этот компонент будет отвечать за оценку текущей ситуации. Комплексно эту оценку можно выразить следующим образом. Если анимат

оценивает ситуацию как угрозу, он нападает на источник этой угрозы; если он оценивает ее как опасность, он убегает. Обобщенная схема поведения с учетом агрессивного компонента приведена на рис. 5.

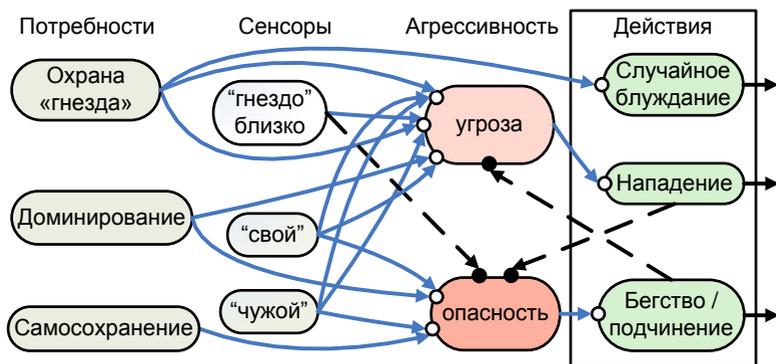


Рис. 5. Обобщенная схема видов поведения с агрессивным компонентом

Таким же образом можно добавить к этой схеме дополнительные потребности.

С технической точки зрения агрессивный компонент может быть реализован с помощью некоторого набора параметров, изменяя которые можно задавать различные тактики поведения анимата, не меняя структуру системы управления.

Аналогичный подход описан в работе [34], где рассматривались принципы паразитического управления аниматом с эмоциональной СУ. Изменение поведения анимата достигалось за счет применения таких механизмов, как изменение весов потребностей, изменение оценочных каналов СУ и влияния на параметры контура обратной связи. В частности, рассматривалась задача перенаправления агрессии особи-хозяина на объект, который оценивается ею как опасный или нейтральный. Было показано, что изменяя некоторые параметры, например, активность тормозящих синапсов, паразит может заставить хозяина нападать на те объекты, на которые в обычном состоянии особь не нападает. Другим рассматриваемым механизмом было пря-

мое выстраивание реакций, когда последовательность ФКД задавалась некоторым управляющим устройством (автоматом), а паразитическое манипулирование сводилось к изменению весов связей в переходах между состояниями этого автомата.

Этому можно дать нейрофизиологическое обоснование. В нейрофизиологии существует так называемый эффект пластичности. Пластичность – это фундаментальное свойство клетки, которое проявляется в относительно устойчивых модификациях реакций нейрона и во внутриклеточных его преобразованиях, обеспечивающих изменение эффективности и направленности межнейронных связей. Свойство пластичности играет особую роль в процессе развития и постоянных изменений нейронной схемы, которые происходят при изменении сенсорного ввода на всех этапах существования организма [40]. Свойство пластичности нейрона лежит в основе процессов научения и памяти целостного организма, проявляющихся на поведенческом уровне. Эффект пластичности, в частности, заключается в том, что изменение весов связей между нейронами может приводить к изменению поведения, и при этом не требуется появления новых правил.

Правила поведения можно описать в терминах коэффициентов определенности (КО), принятых в классической MUCIN-подобной продукционной модели [12]. Для каждого правила существует некоторый априорный вес (значимость), который мы обозначим ω_R – КО правила. Тогда результирующий КО заключения можно определить как произведение КО правила на КО посылки ω_C :

$$(7) \quad \omega = \omega_R \omega_C.$$

Пусть значения всех входных сигналов (в том числе датчиков) нормированы на отрезке $[0, 1]$. Тогда отрицание может определяться как обратная величина ($-\omega = 1 - \omega$), операции «И» и «ИЛИ» сведутся к вычислению минимума и максимума соответственно, а с подтверждающими правилами (посылками) можно поступить естественным образом:

$$(8) \quad \omega = \omega_1 + \omega_2 - \omega_1 \omega_2.$$

Таким образом, для изменения поведения необходимо либо менять КО правил, либо вводить в схему дополнительные фик-

тивные сенсоры, которые будут увеличивать или уменьшать силу синаптических связей. Мы остановимся на втором варианте и будем вводить дополнительные сенсоры. С их помощью, в частности, можно реализовать такое поведение анимата, проявления которого сторонний наблюдатель будет воспринимать как агрессивное.

Теперь надо выбрать параметры, которые будут имитироваться этими фиктивными сенсорами. В качестве основных характеристик АП, которые изучаются в исследованиях на животных, обычно учитываются следующие [19]:

1) наследуемый («врожденный») уровень агрессивности – склонность к агрессивным (активным) действиям;

2) текущий уровень агрессивности (возбуждения), который может понижаться или повышаться в зависимости от состояния животного, результатов его действий и др.;

3) пороговый уровень срабатывания (порог ответа центральной нервной системы на стимуляцию), при снижении которого животное чаще проявляет склонность к нападению, чем стремление к бегству.

Наличие некоторого врожденного уровня агрессивности подтверждается, например, высокими показателями наследуемости агрессивности, которые установлены при исследовании разных видов животных, в частности, мышей [39] и птиц [31]. Влияние результатов взаимодействий особей на уровень их агрессивности подтверждается многими исследованиями. После драки текущая агрессивность особей снижается независимо от результатов столкновения (наступает стадия умиротворения). Но в следующем столкновении с незнакомым партнером победившее в драке животное бывает более агрессивным, а агрессивность особей, терпящих поражение, наоборот, подавляется [33].

С учетом вышесказанного можно выбрать эти три параметра для имитации агрессивной составляющей поведения анимата. Правила их задания и изменения могут быть следующими. Начальный уровень агрессии A_0 не меняется в течение существования анимата. Он задает начальное значение силы связи между посылками и действием «нападение», а величина, обрат-

ная ему, задает начальное значение силы связи между посылками и действием «бегство». Более высокое значение A_0 определяет более агрессивного анимата (т.е. склонного к вступлению в конфликт). Текущий уровень A_c , изначально равный A_0 , увеличивается при возникновении конфликта и с возрастом анимата; A_c уменьшается как при поражении, так и при победе. Пороговый уровень A_l увеличивается при поражении и уменьшается при победе.

Схема управления с учетом агрессивной составляющей, реализованной с помощью трех параметров, приведена на рис. 6. Для унификации сенсоры «свой» и «чужой» объединены в один сенсор «помеха», так как в случае возникновения конфликта и свой, и чужой рассматриваются как помеха (источник отрицательных эмоций). В контексте данной задачи есть внешние события «победа» и «поражение», влияющие на текущий уровень агрессивности. Мы рассматриваем положительный стимул (изгнание соперника или его подчинение) как победу, а отрицательный стимул (нанесение повреждений и т.п.) как поражение.

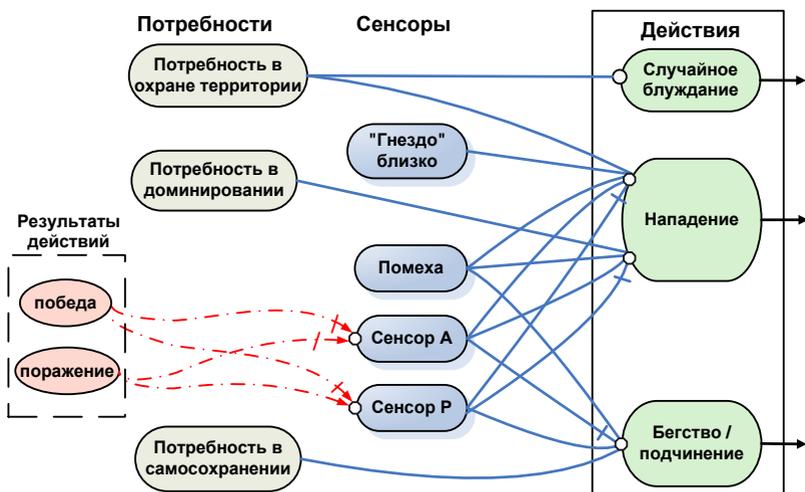


Рис. 6. Схема управления с учетом уровня агрессивности (три параметра). Стрелки с «засечками» – операция отрицания ($\sim X = 1 - X$)

Для отображения на схеме влияния текущего уровня агрессивности и порогового уровня введены два виртуальных внутренних сенсора: сенсор A и сенсор P соответственно. Сенсор A усиливает синаптические связи между сенсорами «помеха» и «дом близко» и действием «нападение» и ослабляет синаптическую связь между сенсором «помеха» и действием «бегство»; сенсор P – наоборот.

Но, благодаря независимости указанных параметров, можно редуцировать эту схему и оставить только два параметра – начальный и текущий уровни (A_0 и A_c). A_0 , как и прежде, задает начальное значение A_c , а сам A_c определяет текущую склонность анимата к вступлению в конфликт. Величина параметра A_c увеличивается после его победы ($W = 1$) и уменьшается после поражения ($W = 0$). Изменение A_c (ΔA_c) определяется коэффициентами усиления α и ослабления β соответствующих синаптических связей:

$$(9) \quad \Delta A_c = \begin{cases} 1 - e^{-\alpha t}, & \text{если } W = 1, \\ e^{-\beta t}, & \text{если } W = 0. \end{cases}$$

Таким образом, A_c будет играть роль памяти анимата об исходах предыдущих столкновений. При этом на макроуровне также будет обеспечена управляемость поведения, что подтверждается результатами экспериментов, приведенными в следующем подразделе. На рис. 7 представлена гибридная нейропродукционная система, дополненная сенсорно-вентильной парой, имитирующей фиктивный сенсор A (параметр A_c), и двумя внешними событиями «победа» и «поражение».

На рис. 7 представлены вентильные элементы, о которых говорилось выше. Это – элементы контура положительной обратной связи эмоционального компонента СУ. Роль сервисных элементов (или нейронов, СН) заключается в определении единственного выходного сигнала – реакции системы. В некотором смысле мы можем рассматривать их как элементы сети Кохонена, действующих по принципу «Победитель забирает все». Смысл входных синапсов «возбуждение» и «торможение» очевиден: увеличение и уменьшение выходной активности элементов соответственно.

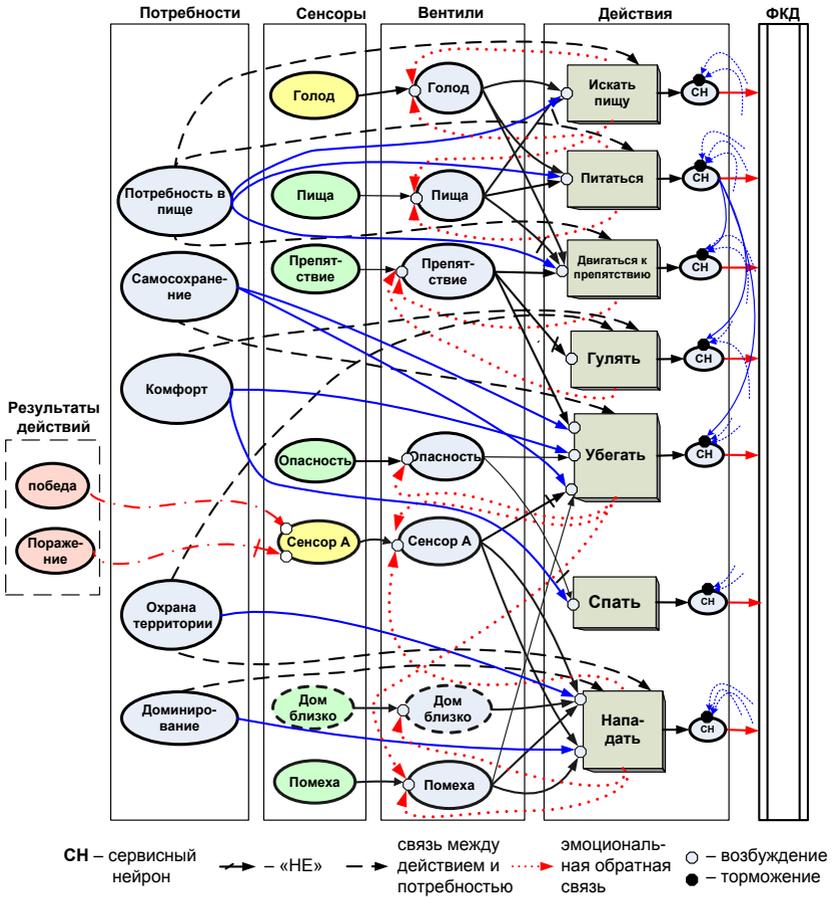


Рис. 7. Архитектура эмоциональной СУ с учетом уровня агрессии (два параметра)

4. Реализация обобщенной модели агрессивного поведения

Для подтверждения работоспособности предложенной схемы было проведено имитационное моделирование с использованием системы многоагентного моделирования Kvorum [17]. В

экспериментах исследовалось поведение анимата, обладающего потребностями в пище, самосохранении, комфорте и доминировании. Анимат перемещался по полигону (рис. 8), на котором присутствовали помехи (обозначены красным цветом) и была еда (зеленым).

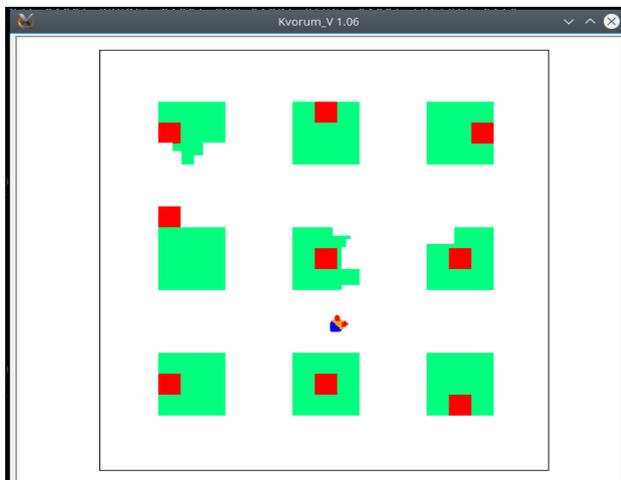


Рис. 8. Внешний вид окна моделирования

Для того чтобы уменьшить влияние случайных факторов, помехи не перемещались по полигону, а располагались стационарно. При обнаружении помехи анимат нападал на нее или убегал в зависимости от величины потребностей и своего внутреннего состояния (A_c); в случае нападения его выигрыш или проигрыш определялся соотношением его силы F_a и силы противника F_c и рассчитывался на основе вероятности (10) $p = F_a / (F_a + F_c)$.

В ходе экспериментов ставилась следующая задача: выявить изменение поведения анимата в зависимости от значений и коэффициентов, которые определяют величину текущего уровня агрессивности. На A_c влияют значение A_0 , коэффициенты усиления и ослабления силы синаптических связей (α и β) и величина потребностей в самосохранении и доминировании D .

Изменение поведения анимата выражается в соотношении действий «нападение» или «бегство».

Были проведены две серии экспериментов по 10 запусков для каждой комбинации значений исходных параметров; каждый эксперимент – 5000 тактов модельного времени. Потребность в доминировании изменялась от 0,2 до 0,4. Для получения более контрастных результатов в первой серии анимат имел дело с противниками, которые существенно превосходили его по силе, а во второй серии, наоборот, он был существенно сильнее противников. Полученные в ходе экспериментов результаты отражены на рис. 9. Здесь K – соотношение коэффициентов усиления и ослабления синаптических связей α и β : $K = \alpha / (\alpha + \beta)$.

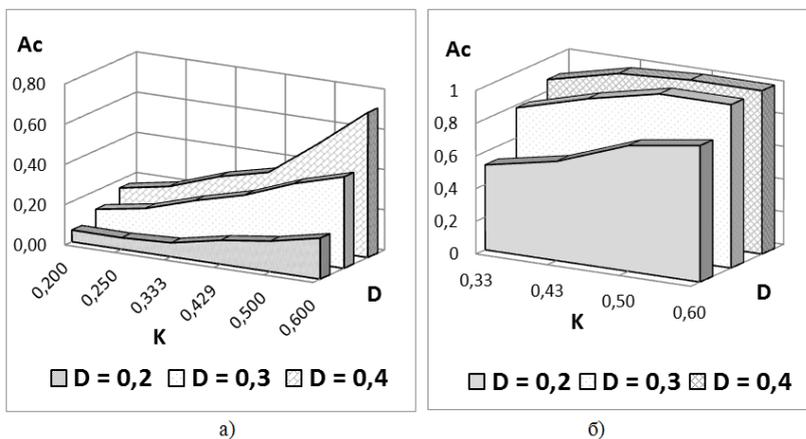


Рис. 9. Результаты экспериментов: а) серия со слабыми противниками; б) серия с сильными противниками

С одной стороны, эти эксперименты (рис. 9) показали достаточно очевидные результаты. Увеличение потребности в доминировании D , как и увеличение коэффициента усиления α по сравнению с коэффициентом ослабления β (значение K), приводят к росту уровня агрессивности. С другой стороны, эксперименты подтвердили возможность управления поведением ани-

мата с помощью введенных параметров и позволили провести количественную оценку исследуемой зависимости.

5. О профессиональной карьере аниматов

Перейдем теперь от структурной (или реактивной) модели агрессивного поведения к верхнему, феноменологическому уровню управления.

5.1. АГРЕССИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ПОВЕДЕНИЯ

В мирмекологии описывается такой интересный феномен, как «профессиональная карьера» муравьев. Суть этого явления заключается в следующем. Изначально молодой особи достается самый неудобный, удаленный от гнезда кормовой участок. В ходе освоения этого участка, по мере роста опыта и пр., муравей постепенно переходит на более удобные, расположенные все ближе к гнезду участки. Вершиной профессиональной карьеры является получение места наблюдателя на куполе гнезда. При этом опытный муравей, прошедший весь этот сложный путь роста, хорошо знает всю ту территорию, которую он успел освоить в процессе своей длительной трудовой деятельности. См., например, работы Захарова [9] или Длусского [6, 30]. Этот механизм освоения территории характерен для муравьев рода *Formica*, однако есть все основания полагать, что он имеет и сугубо техническую целесообразность с точки зрения стратегии решения задач территориального поведения искусственных агентов – роботов.

Попробуем далее определить, каким образом могла бы решаться задача воспроизведения такого феномена, какие базовые механизмы могут лежать в основе этого поведения.

Судя по всему, проанализировав описание феноменов пищевого поведения (см. ту же работу [9]), схема поведения муравья на «алгоритмическом» уровне выглядит следующим образом:

1. В начале трудового дня муравьи выходят из гнезда и начинают движение по дороге.
2. Обнаружив свободный кормовой участок, муравей начинает его освоение. При этом он, благодаря хорошей памяти, запоминает сам участок и его окружение.
3. Если на участке появляется другой муравей, происходит некий конфликт, в результате которого более молодой или неопытный индивид изгоняется с территории.
4. В результате естественной убыли (смертность, потеря ориентации и пр.) некоторые участки остаются без хозяина. Поскольку муравьи, судя по всему, вовсе не стремятся отправиться именно на свой участок, а пытаются занять первый попавшийся, то рано или поздно на оставшийся без хозяина участок находятся претенденты.
5. Из претендентов на спорном участке остается наиболее агрессивный (опытный, старый).

Итак, эта достаточно четкая схема поведения включает в себя два важнейших компонента: механизм памяти и механизм разрешения конфликта (то поведение, которое можно отнести к категории агрессивного).

Здесь следует отметить, что нашей задачей не является формализация задачи групповой фуражировки, так, как это было предложено в работе [32]. Мы рассматриваем один частный феномен – механизм самоорганизации группы агентов (аниматов) при решении задачи распределения кормовых участков.

5.2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим следующую модельную задачу. Пусть имеется гнездо как зона начального положения аниматов. От гнезда идет дорога, проходящая мимо ряда кормовых участков. Каждый кормовой участок окружен некоторым множеством ориентиров – объектов, регистрируемых сенсорной системой аниматов. На рис. 10 приведен пример такого участка – зоны обитания аниматов.

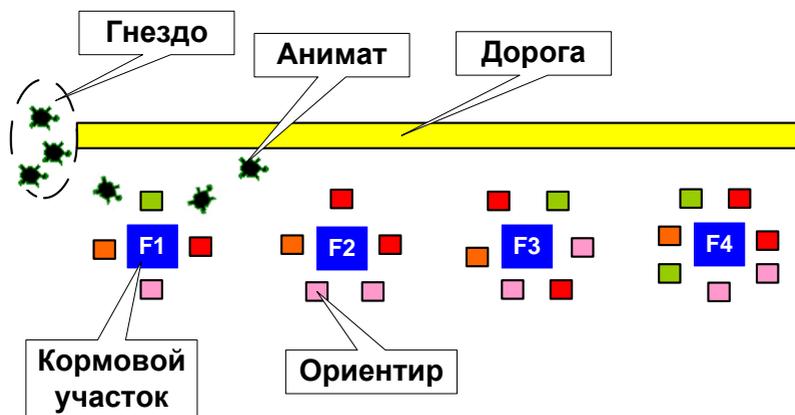


Рис. 10. Полигон с кормовыми участками F1–F4

Кормовые участки обозначены, как F1, F2, F3 и F4. В этом мире аниматов существуют следующие виды объектов: дорога, ориентиры, кормовые участки и особи-аниматы. Анимат-муравей снабжен множеством сенсоров, умеющих регистрировать расстояние до объектов и их характеристики (для наглядности – цвет). Сами аниматы имеют возможность генерировать некий сигнал, который может быть зарегистрирован другими участниками. Это своего рода маяк, позволяющий определить состояние анимата, степень его «агрессивности». Причины возникновения агрессии и способы ее проявления мы подробно рассмотрели ранее, поэтому здесь будем говорить не о внутренних механизмах, а о результатах ее проявления.

Задача заключается в реализации механизма распределения аниматов по территории таким образом, чтобы (а) обеспечивалось накопление опыта (знаний об окружающем мире) аниматов и (б) сохранялась устойчивость системы к внешним возмущениям (естественная убыль участников процесса не нарушала бы единой схемы территориального распределения).

Перечень умений анимата весьма ограничен. Его деятельность складывается из следующих поведенческих процедур:

- 1) поиск дороги;
- 2) движение по дороге;

- 3) поиск кормового участка;
- 4) запоминание сцены;
- 5) оценка ситуации.

Двигательные процедуры (1)–(3) реализуются естественным образом, с помощью, например, конечных автоматов. Интересно, что реализация функции запоминания, накопления опыта и узнавания участков является в данной схеме несущественной с точки зрения организации поведения. Одна из простейших реализаций механизма памяти выглядит следующим образом:

Память и опыт. Оказавшись на кормовом участке (для этого регистрируется цвет соответствующего поля), анимат начинает циклический осмотр: регистрируется текущий угол поворота и определяется код объекта (цвет ориентира), попавшего в поле зрения анимата. Таким образом, получается описание текущей сцены следующего вида:

$$(11) Sc(t) = \{(\alpha_i, \{O_i^j\})\}.$$

Здесь α_i – угол поворота, $\{O_i^j\}$ – множество зарегистрированных в данном положении ориентиров. При этом угол поворота α_i определяется некоторым шагом, который может быть и весьма большим. Например, в проведенных экспериментах достаточно было осуществлять поворот с шагом в 4 румба ($4/32$ окружности). Количество регистрируемых ориентиров (их видов или цветов) тоже ограничено. Итак, текущая сцена – это упорядоченный список из элементов $\{O_i^j\}$.

Память анимата представляет собой список зарегистрированных сцен Sc_i с соответствующими весами ω_i :

$$(12) M(t) = [(Sc_i, \omega_i)].$$

Распознав сцену в некоторый момент, анимат сопоставляет ее со списком уже имеющихся. Если обнаруживается похожая сцена, то текущая сцена считается знакомой. Анимат в этом случае увеличивает значение соответствующего веса ω_i . Этот вес играет большую роль в поведении анимата, так как он характеризует степень знакомства анимата с этим участком, его опыт. Реализация процедуры сопоставления сцен определяется тем, каким образом регистрируются ориентиры: с использова-

нием вероятностного аппарата, коэффициентов уверенности, двоичной логики и т.п. В любом случае можно использовать результат пересечения компонент двух сцен – текущей $Sc(t)$ и находящейся в списке Sc_i :

$$(13) d(Sc(t), Sc_i) = \bigwedge_k Sc(t)^k, Sc(t)_i^k.$$

Итак, по мере появления на том или ином участке анимат запоминает окружение (сцену), регистрируя при этом количество посещений этого участка (параметр ω_i).

Конфликты. Процедура оценки ситуации запускается при обнаружении соперника на участке и заключается в том, что анимат устанавливает уровень своей агрессивности и сравнивает его с уровнем агрессивности соперника. Если противник более агрессивен, то анимат покидает участок – управление передается автомату, реализующего процедуру поиска дороги и т.д. Уровень агрессивности определяется следующим соотношением:

$$(14) A(t) = k_1 Age(t) + k_2 \omega_i.$$

Здесь $Age(t)$ – возраст анимата (в некоторых единицах времени – циклов моделирования), ω_i – вес текущей сцены (степень «знакомства» участка), k_1, k_2 – некоторые весовые коэффициенты. Таким образом, уровень агрессивности зависит от возраста (мирмекологи утверждают, что чем старше особь, тем она более агрессивна) и от того, насколько особь знакома с участком, т.е. считает его своим.

Вопросы начального размещения. С одной стороны, в муравьином семействе основной активной силой является опытный муравей-разведчик. Он исследует новые территории, он знаком с окружающей территорией, он даже переносит неопытных молодых особей, не способных к ориентации новом для них пространстве [6]. С другой стороны, по наблюдениям тех же биологов первыми на кормовые участки выходят молодые особи. Именно такой порядок выхода (сначала молодые, затем более опытные) был реализован в проведенных вычислительных экспериментах. С технической точки зрения такая стратегия удобна тем, что молодые особи, первыми приходя на

ближайшие свободные участки, успевают запомнить их до того, когда придет более опытный индивид и прогонит молодого.

Вычислительные эксперименты. Был проведен ряд экспериментов по моделированию поведения группы аниматов на полигоне, представленном на рис. 11. Для этого использовалась среда моделирования Kvoqum [17], в которой каждый анимат снабжался множеством поведенческих автоматов. Общий управляющий алгоритм пищевого поведения, схема которого была приведена выше, был реализован мета-автоматом. Задачей мета-автомата было активизировать частные поведенческие процедуры (автоматы) в зависимости от текущих условий и состояния системы. Схема мета-автомата (фактически реализующего общую стратегию пищевого поведения) приведена на рис. 11. Она содержит автоматы, соответствующие процедурам Sleep («спать»), SearchRoad («искать дорогу»), MoveRoad («двигаться по дороге»), SearchFood («искать пищу»), LookAround («оглядеться») и EstimateSit («оценить ситуацию»).

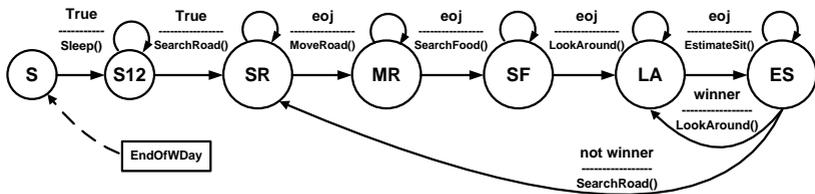


Рис. 11. Мета-автомат, реализующий стратегию пищевого поведения

Мета-автомат реализован как автомат Мили. Пометки на дугах интерпретируются как условие перехода (числитель) и выполняемая процедура (знаменатель). Условие *eoj* (end of job, конец работы) – это предикат, определяющий условие завершения работы автомата, реализующего соответствующую процедуру. Следует отметить, что переходы из состояния ES определяются результатами выполнения функции оценки *EstimateSit*: если соперник слабее (менее агрессивен), то анимат остается на кормовом участке (считается победителем – winner). Иначе – начинает искать дорогу, т.е. покидает участок. Автомат прину-

дительно сбрасывается в начальное состояние при наступлении события «EndOfWDay» – конец рабочего дня, возвращение в гнездо.

5.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Типичная конфигурация эксперимента предполагала, что кормовых участков меньше, чем имеется аниматов-претендентов. В данном случае – 5 аниматов и 4 участка $F1-F4$. Участок $F1$ – это ближайший гнезду. Все аниматы имели ограниченный срок жизни – 100 условных циклов (на один цикл – «год» – приходилось 5000 тактов модельного времени). Кроме того, у аниматов имелся разный начальный возраст: от 1 «года» (анимат А-1, самый молодой) до 40 «лет» (анимат А-5).

На рис. 12 представлен жизненный путь анимата «среднего возраста». По оси абсцисс отложен возраст анимата (от 20 до 100), по оси ординат – количество посещений кормовых участков.

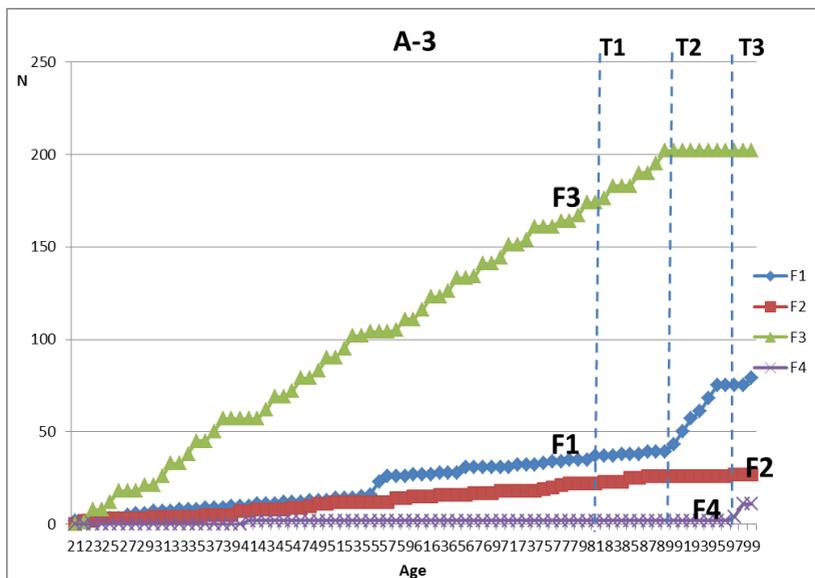


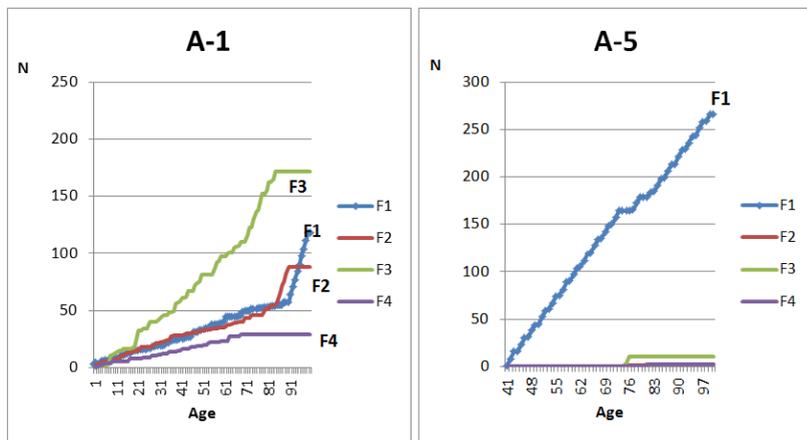
Рис. 12. Жизненный путь анимата «среднего возраста»

Как видно, основной кормовой участок для анимата «средняка» – это участок $F3$. На ближние участки $F1$ и $F2$ претендуют более опытные особи. Несмотря на то, что этот анимат посещает ближние участки первым (сначала выходят более молодые), он оттуда изгоняется. Характерными моментами в жизни анимата А-3 являются точки $T1$, $T2$ и $T3$. В момент времени $T1$ «умирает» самый старый анимат А-5, который занимал участок $F1$. Начинается перераспределение участков, но анимат пока продолжает работать на своем участке (переходной процесс, ему мешает более старший коллега А-2). Начиная с момента времени $T2$ анимат А-3 начинает осваивать ближайший участок $F1$, который освободил «умерший» к тому моменту времени анимат А-2. Точка $T3$ – это окончание устойчивого развития. К этому моменту разница в возрасте аниматов перестает играть значительную роль (как это было в начальный период), разница между уровнями агрессивности у соседей нивелируется (для анимата А-3 участок $F1$ все-таки не самый знакомый).

Для наглядности ниже изображены графики распределения по территории для самого молодого (рис. 13а) и самого старшего (рис. 13б) аниматов.

Анимат А-1 начинает осваивать участок $F1$ лишь к концу своей жизни (вершина его профессиональной карьеры). Поведение же анимата А-5 совсем просто – он постоянно пребывает на участке $F1$.

Различные аномалии, типа той, когда анимат А-5 в возрасте 70 «лет» некоторое время поработал на участке $F3$, объясняются тем, что и сами сцены распознаются аниматами не всегда однозначно, и существуют помехи при самом движении. Например, если на пути анимата обнаруживается другой индивид, то срабатывает рефлекс обхода препятствия. Иногда это приводит к тому, что анимат теряет цель, пропускает кормовой участок или сходит с дороги.



а)

б)

Рис. 13. Жизненный путь аниматов: а) молодая особь: возраст от 1 до 100 циклов; б) опытная особь: возраст от 40 до 100 циклов

5.4. ВЫВОДЫ

Сама по себе задача фуражировки, составной частью которой является этап распределения аниматов (роботов, агентов) по кормовым участкам, является весьма популярной в групповой робототехнике (см., например, [37]). Действительно, это весьма наглядная задача, ориентированная на получение практически значимых результатов [43]. Однако в основном при решении этой задачи авторы сосредотачиваются на реализации весьма нетривиальных процедур – от схем разделения труда до совместного планирования распределения участков [44].

В отличие от таких подходов, описанная поисковая схема не требует привлечения никаких дополнительных, искусственных механизмов. Разумеется, ожидать оптимальности решения в такой схеме не приходится. Вопросы оптимальности размещения – это хорошо известная задача, решенная, к примеру, для игр автоматов при распределении ресурсов (кормушек) [28]. Здесь же основным вопросом было определение базовых меха-

низмов, требуемых для получения такого наблюдаемого в природе феномена, как разведка и распределение муравьев по участкам. Оказывается, что такими механизмами является доминирование (как результат агрессивных действий) и память.

6. Заключение

Итак, были рассмотрены два аспекта агрессивного поведения: внутренний, на уровне архитектуры системы управления анимата, и внешний, феноменологический. Несмотря на то, что агрессивность поведения является относительной и ситуативной и имеет оценочный характер, использование понятия агрессии позволяет нам естественным образом описывать поведенческие аспекты функционирования робота (анимата).

Предложенная обобщенная модель агрессивного поведения (раздел 4) позволяет, с одной стороны, учесть опыт предыдущих столкновений (участия в конфликтах), а с другой стороны, имитировать феномен увеличения агрессивности с возрастом анимата и эффект забывания собственного опыта. Изменяя значения параметров, мы можем управлять этим поведением и создавать более или менее агрессивных (активных) аниматов. Таким образом, введение в систему управления дополнительного параметра «агрессивность» позволяет обеспечить разнообразие поведения анимата в зависимости от состояния среды и управление аниматом или группой аниматов без дополнительных правил поведения.

Мы старались очень аккуратно обращаться с термином «агрессия» при описании фуражировки (раздел 5). Можно ли считать поведение аниматов при обнаружении претендента на участок агрессивным – это спорный вопрос. С одной стороны, генерация некоторого воспринимаемого и оцениваемого «соперником» сигнала может рассматриваться как принятие «агрессивной» позы или как некий суррогат процедуры нападения. С другой стороны, мы не можем однозначно определить изгнание как агрессивное действие, потому что оно должно приводить к некоторому ущербу, а изгоняемый соперник никакого урона не несет. (Если не считать ущербом необходимость

уходить дальше от гнезда). Кроме того, этот подход не противоречит обобщенной модели агрессивного поведения и базируется на тех же параметрах и эффектах.

Предложенный механизм поведения, имитирующий учет агрессивной составляющей, не зависит от решаемой задачи и может использоваться как базовый при реализации различных моделей социального поведения в групповой робототехнике. В дальнейшем планируется исследовать поведение группы аниматоров, обладающих агрессивным компонентом.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 16-11-00018 (архитектура системы управления) и РФФИ 17-29-07083-офи_м (регулятивные механизмы управления поведением).

Литература

1. АНЦУПОВ А.Я., ШИПИЛОВ А.И. *Конфликтология*. – М.: ЮНИТИ, 2000. – 551 с.
2. БУТОВСКАЯ М.Л. *Агрессия и примирение как базовые свойства социальных систем: человек и другие приматы //* Материалы конференции «Антропология на пороге III тысячелетия», Москва, 29-31 мая 2002 г. – М.: Старый сад, 2004. – С. 125–160.
3. ГИЛЯРОВ М.С. *Биологический энциклопедический словарь /* Под ред. М.С. Гилярова. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 864 с.
4. ГОЛЬЦМАН М.Е. *Социальный контроль поведения млекопитающих: ревизия концепции доминирования //* Итоги науки и техники. Сер. зоол. позв. – 1983. – Т. 12. – С. 71–150.
5. ДАНИЛОВА Н.Н., КРЫЛОВА А.Л. *Физиология высшей нервной деятельности*. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. – 478 с.
6. ДЛУССКИЙ Г.М. *Муравьи рода Формика*. – М.: Наука, 1967. – 233 с.
7. ЗАХАРОВ А.А. *Муравей, семья, колония*. – М.: Наука, 1978. – 144 с.

8. ЗАХАРОВ А.А. *Организация сообществ у муравьев*. – М.: Наука, 1991. – 277 с.
9. ЗАХАРОВ А.А. *Муравьи лесных сообществ, их жизнь и роль в лесу*. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. – 404 с.
10. ЗОРИНА З.А., ПОЛЕТАЕВА И.И., РЕЗНИКОВА Ж.И. *Основы этологии и генетики поведения. Учебник. 2-е изд.* – М.: Изд-во МГУ: Изд-во «Высшая школа», 2002. – 383 с.
11. ИЛБИН Е.П. *Эмоции и чувства*. – С-Пб.: Питер, 2007. – 784 с.
12. КАРПОВ В.Э. *Эмоции роботов* // Труды XII национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2010, 20-24 сентября 2010 г., Тверь. – Т.3. – М.: Физматлит, 2010. – С. 354–368.
13. КАРПОВ В.Э. *Эмоции и темперамент роботов. Поведенческие аспекты* // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – №5. – С. 126–145.
14. КАРПОВ В.Э. *Модели социального поведения в групповой робототехнике* // Управление большими системами. – 2016. – Вып. 59. – С. 165–232.
15. КАРПОВ В.Э. *Сенсорная модель подражательного поведения роботов* // Материалы VI междунар. науч.-техн. конф. "Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем" (Open Semantic Technologies for Intelligent Systems, OSTIS-2016), Минск, 18-20 февраля 2016 г. – Минск: БГУИР, 2016. – С. 471–476.
16. КАРПОВ В.Э., КАРПОВА И.П., КУЛИНИЧ А.А. *Социальные сообщества роботов*. – М.: УРСС, 2019. – 352 с.
17. КАРПОВ В.Э., РОВБО М.А., ОВСЯННИКОВА Е.Е. *Система моделирования поведения групп робототехнических агентов с элементами социальной организации Кворум* // Программные продукты и системы. – 2018. – Т. 31, №3. – С. 581–590.

18. КАРПОВА И.П. *Об одной реализации модели агрессивного поведения в групповой робототехнике* // Материалы 10-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2017), 11-16 сентября 2017 г., с. Дивноморское. – Т.2. / Под ред. И.А. Каляева. – 2017. – С. 289–292.
19. КУДРЯВЦЕВА Н.Н., МАРКЕЛЬ А.Л., ОРЛОВ Ю.Л. *Агрессивное поведение: генетико-физиологические механизмы* // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2014. – Т. 18, №4/3. – С. 1133–1155.
20. ЛОРЕНЦ К. *Агрессия (так называемое «зло»)*. – М.: Республика, 1994. – 272 с.
21. МСХА. *Потребности животных* // Зооинженерный факультет МСХА [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.activestudy.info/potrebnosti-zhivotnykh> (дата обращения: 22.05.2018).
22. СИМОНОВ П.В. *Потребностно-информационная теория эмоций* // Вопросы психологии. – 1982. – Т. 6. – С. 44–56.
23. СИМОНОВ П.В. *Мотивированный мозг*. – М.: Наука, 1987. – 272 с.
24. СИМОНОВ П.В. *Созидающий мозг (нейронные основы творчества)*. – М.: Наука, 1993. – 111 с.
25. ТИНБЕРГЕН Н. *Социальное поведение животных* / Пер. с англ. под ред. акад. РАН П.В. Симонова. – М.: Мир, 1993. – 81 с.
26. ФОМИНЫХ И.Б. *Классификация эмоций: информационный подход* // Труды 4-й Международной научно-практической конференции "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". – 2007. – Т. 2. – М.: Физматлит, 2007.
27. ХАЙНД Р. *Поведение животных*. – М.: Мир, 1975. – 856 с.
28. ЦЕТЛИН М.Л. *Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем*. – М.: Наука, 1969. – 316 с.
29. BROWN S. et al. *Rational aggressive behaviour reduces interference in a mobile robot team* // Proc. Int. Conf. Adv. Robot. ICAR '05. – 2005. – P. 741–748.

30. DLUSSKY G.M., VOLTZIT O.V., SULKHANOV A.V. *Organization of group foraging in ants of genus Myrmica* // Zool. Zhurnal. – 1978. – Vol. 57, No. 1. – P. 65–77.
31. DRENT P.J., VAN OERS K., VAN NOORDWIJK A.J.. *Realized heritability of personalities in the great tit (Parus major)* // Proc. R. Soc. B Biol. Sci. – 2003. – Vol. 270, No. 1510. – P. 45–51.
32. FEDOSEEVA E.B. *A Technological Approach to the Description of Group Foraging in the Ant Myrmica rubra* // Entomol. Rev. – 2015. – Vol. 95, No. 8. – P. 984–999.
33. HSU Y., EARLEY R.L., WOLF L.L. *Modulation of aggressive behaviour by fighting experience: Mechanisms and contest outcomes* // Biol. Rev. Camb. Philos. Soc. – 2006. – Vol. 81, No. 1. – P. 33–74.
34. KARPOV V. *The parasitic manipulation of an animat's behavior* // Biol. Inspired Cogn. Archit. – 2017. – Vol. 21. – P. 67–74.
35. KARPOV V.E. *Emotions and Temperament of Robots: Behavioral Aspects* // J. Comput. Syst. Sci. Int. – 2014. – Vol. 53, No. 5. – P. 743–760.
36. KULINICH A.A. *A model of agents (robots) command behavior: The cognitive approach* // Autom. Remote Control. – 2016. – Vol. 77, No. 3. – P. 510–522.
37. LABELLA T.H., DORIGO M., DENEUBOURG J.-L. *Division of Labour in a Group of Robots Inspired by Ants' Foraging Behaviour* // Technical Report No. TR/IRIDIA/2004-013, October 12, 2006.
38. MANNING A., DAWKINS M.S. *An Introduction to Animal Behaviour*. – Cambridge University Press, 1998. – 450 p.
39. VAN OORTMERSSEN G.A., BAKKER T.C.M. *Artificial selection for short and long attack latencies in wild Mus musculus domesticus* // Behav. Genet. – 1981. – Vol. 11, No. 2. – P. 115–126.
40. SCHAEFER N. et al. *The malleable brain: plasticity of neural circuits and behavior – a review from students to students* // J. Neurochem. – 2017. – Vol. 142, No. 6. – P. 790–811.

41. SCHEUTZ M., SCHERMERHORN P. *The More Radical, the Better: Investigating the Utility of Aggression in the Competition among Different Agent Kinds* // Proc. 8th Int. Conf. Simul. Adapt. Behav "From Anim. to Animat". – 2004. – P. 445–454.
42. SHILOV I.A. *Population homeostasis* // Zool. Zhurnal. – 2002. – Vol. 81, No. 9. – P. 1029–1047.
43. SICILIANO B., KHATIB O. *Springer Handbook of Robotics* / Eds.: B. Siciliano, O. Khatib. – Springer International Publishing, 2016. – 2227 p.
44. ZAHADAT P., SCHMICKL T. *Division of labor in a swarm of autonomous underwater robots by improved partitioning social inhibition* // Adapt. Behav. – 2016. – Vol. 24, March. – P. 1–11.
45. ZHANG Y., VAUGHAN R. *Ganging up: Team-based aggression expands the population/performance envelope in a multi-robot system* // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. – 2006. – P. 589–594.

AGGRESSION IN THE ANIMATS WORLD, OR ABOUT SOME MECHANISMS FOR AGGRESSIVE BEHAVIOR CONTROL IN GROUP ROBOTICS

Irina Karpova, National Research University Higher School of Economics, National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Cand.Sc., associate professor (karpova_ip@mail.ru).

Valery Karpov, National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Cand.Sc., associate professor (karpov_ve@mail.ru).

Abstract: Some possible ways of implementing aggression as one of the mechanisms for the social behavior formation in robots groups are discussed in this work. Aggression is considered as a way to resolve conflicts over resources. The features of the aggressive behavior of eusocial insects (ants) are used as a basic model. A reactive model of behavior was proposed. The aggressive component is integrated into the demand-emotional architecture of the animat's control system, which is presented as a hybrid neuroproduction system. Also, the question of using an aggressive component at the phenomenological level of behavior management. Imitation modeling experiments were carried out on the example of realization of domination in a group. The issue of determining the basic mechanisms for feed areas distribution, which is a part of the foraging task, is also considered. It is shown that such mechanisms are domination (as the result of aggressive actions) and the animats

memory. The simulation results confirm that the addition of the "aggressiveness" parameter to the control system provides a variety of animats behavior taking into account the environment state. The proposed aggressive behavior model does not depend on the solved problem, and allows you to manage the group in natural form.

Keywords: group robotics, social behavior models, aggressive behavior, emotion control system, foraging task.

УДК 004.896+007.52

ББК 32.816

DOI: 10.25728/ubs.2018.76.6

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии М.В. Губко.*

Поступила в редакцию 22.06.2018.

Опубликована 30.11.2018.

**МОДЕЛИ И СТРУКТУРА УПРАВЛЕНИЯ
РАЗРАБОТКОЙ И ВНЕДРЕНИЕМ
ИННОВАЦИОННЫХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ
(НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА)**

**II. МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА СТИМУЛИРОВАНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭЛЕМЕНТЫ
СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ¹**

Бурков В. Н.², Еналеев А. К.³,
(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Строгонов В. И.⁴
(ОАО НИИАС, Москва)

Статья состоит из двух частей. Во второй части статьи продолжено исследование механизмов управления выполнением разработок в составе сложных проектов, обеспечивающих энергоэффективность. Рассмотрена модель стимулирования энергоэффективности в последовательности реализации проектов в мультипроектной структуре. Для этой модели мы предложили оптимальный механизм. Этот механизм включает процедуру планирования, функции штрафов за невыполнение планов и функцию поощрения за результаты проекта. Функционирование системы рассматривается как игра Центра и последовательно связанных агентов, реализующих проекты. Стратегией Центра является выбор механизма. Стратегиями агентов являются сообщения Центру информации о своих параметрах и выбор результатов проектов. Информация о параметрах агентов необходима для вычисления планов на основании процедуры планирования. При этом агенты могут сообщать искаженные данные. Показано, что предложенный оптимальный механизм побуждает агентов сообщать достоверную информацию и выбирать выходы проектов, совпадающие с планами. С учетом результатов первой части статьи, а именно, исследования механизмов оценивания проектов и распределения бюджетного финансирования, предложены подхо-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта №17-20-05216.

² Владимир Николаевич Бурков, д.т.н., профессор (vlab17@bk.ru).

³ Анвер Касимович Еналеев, к.т.н., с.н.с. (anverena@mail.ru).

⁴ Владимир Иванович Строгонов, д.т.н. (v.strogonov@vniias.ru).

ды к формированию структуры системы управления реализацией комплексных проектов.

Ключевые слова: энергоэффективность, распределение фондов, стимулирование, контроль, структура управления, организация.

1. Введение

В первой части статьи (см. [3]) были описаны и исследованы механизмы отбора наиболее перспективных проектов в области разработки средств и технологий использования альтернативных видов энергии для тяги поездов, а также механизмы распределения ограниченного бюджета между отобранными комплексными проектами и их частями.

После отбора проектов и определения размеров фондов на отобранные проекты необходимо установить механизмы планирования и стимулирования выполнения работ исполнителями этих проектов. При этом следует учесть, что управляющий орган (УО), реализующий планирование и стимулирование деятельности, в меньшей степени информирован о возможностях по реализации работ, по сравнению со специалистами-исполнителями этих работ. В этих условиях УО для целей планирования и стимулирования вынужден запрашивать эту информацию у специалистов – исполнителей работ. Поскольку УО и исполнители работ имеют собственные интересы, возникает проблема исключения манипулирования информацией, сообщаемой в УО [4–6, 19, 20].

Ниже рассмотрим задачу построения согласованных организационных механизмов, обеспечивающих неманипулируемость для случая системы исполнителей (агентов), связанных между собой последовательной технологией выполнения работ.

Это рассмотрение существенно опирается на [5, 6].

Используя результаты исследований первой части статьи [3], рассмотрим во второй части статьи также дополнительные требования и возможности структурного построения системы управления научно-технической деятельностью организации, реализуемой в УО.

2. Элементы системы управления инновациями

2.1. МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА СТИМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Проекты, отобранные для разработки, как правило, являются комплексными и представляют собой систему подпроектов, бизнес процессов, мероприятий и работ, входо-выходные связи которых описываются сетевой структурой (рис. 1). Каждый элемент этого комплекса работ вносит свой вклад в энергоэффективность всего проекта. Поэтому возникает задача стимулирования каждого элемента этой структуры, отвечающего за соответствующую работу проекта.

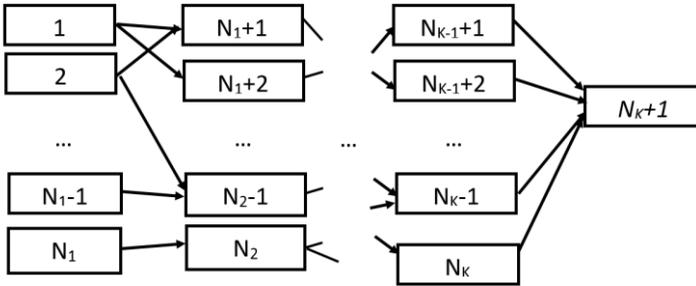


Рис. 1. Пример сетевой структуры комплексного проекта

В исследованиях [1, 9, 10] по организационному управлению разработана методология построения систем стимулирования, в основном для условий полной информации управляющего органа (УО) о моделях агентов, участвующих в реализации работ сложного проекта. Для случая неполной информированности, обычно имеющего место в задачах управления комплексными проектами, эта задача исследована только для слабо связанных друг с другом агентов [7], в то время как работы комплексного проекта связаны в последовательности их выполнения и результаты деятельности предшествующих работ сильно влияют на результаты последующих работ.

Рассмотрим здесь пример простейшей структуры работ, связанных строгой последовательностью выполнения (для более общего случая древовидной структуры связей агентов описанный подход и результаты принципиально не отличаются).

Описание модели.

Представим целевую функцию УО в виде

$$\Phi(x, y, r) = c_1 y_1 - z_1(x_1, y_1) - v_1(y_1, r_1) + \\ + \sum_{i=2}^n [c_i(y_i - y_{i-1}) - z_i(x_i, y_i) - v_i(y_i, r_i)],$$

где y_i – значение состояния агента, которое характеризует результат выполнения агентом i -й работы (например, удельная экономия энергоресурсов по сравнению с текущим либо установленным нормативным уровнем); x_i – устанавливаемый УО план i -й работы; $z_i(x_i, y_i)$ – значение потерь УО от несовпадения показателя y_i с планом x_i ; $v_i(y_i, r_i)$ – величина потерь от отклонения уровня y_i от некоторого наилучшего значения энергоэффективности r_i ; $r_i \in [r_i^H, r_i^B]$, $y_i \in [0, r_i^B]$, $x_i \in [0, r_i^B]$. Предполагается, что значение r_i задано, но неизвестно точно для УО (ему известны только допустимые границы этих параметров). Здесь r_i^H – нижнее допустимое значение показателя r_i , r_i^B – верхнее допустимое значение этого показателя, c_i – заданные параметры, характеризующие ценность значений состояний y_i для УО.

Примем $0 \leq y_i \leq r_i$, $z_i(x_i, y_i) \geq 0$, $z_i(x_i, x_i) = 0$, $v_i(y_i, r_i) \geq 0$, $v_i(r_i, r_i) = 0$. Пусть $v_i(y_i, r_i) = a_i(r_i - y_i)$, где $0 \leq a_i \leq c_i$. При этом каждый агент, выполняющий i -ю работу, т.е. выбирающий значения величин y_i , знает значение r_i , а УО знает только допустимые границы этого показателя r_i^H и r_i^B . Предположим, что последовательные работы связаны друг с другом следующими соотношениями: $r_{i+1}^H = r_i^H + \Delta_{i+1}^H$, $r_{i+1}^B = r_i^B + \Delta_{i+1}^B$, $i = 1, \dots, n-1$.

Пусть целевая функция первого агента равна $f_1(x_1, y_1, r_1) = \sigma_1(y_1) - \vartheta_1(x_1, y_1) - \omega_1(y_1, r_1)$, где $\sigma_1(y_1)$ – функция поощрения, $\vartheta_1(x_1, y_1)$ – функция штрафов за отклонение состояния от плана, $\omega_1(y_1, r_1)$ – функция затрат первого агента. Целевую функцию i -го агента (исполнителя i -й работы) представим в виде $f_i(x_i, y_i, y_{i-1}, r_i) = \sigma_i(y_{i-1}, y_i) - \vartheta_i(x_i, y_i) - \omega_i(\delta_i, r_i)$, где $\sigma_i(y_{i-1}, y_i)$ – функция поощрения за результат y_i при состоянии

y_{i-1} предшествующего агента, $\mathcal{G}_i(x_i, y_i)$ – функция штрафов за отклонение состояния от плана, $\omega_i(\delta_i, r_i)$ – функция затрат i -го агента, зависящая от вклада агента в повышение энергоэффективности. Здесь $\delta_{i+1} = y_{i+1} - y_i$, $i = 1, \dots, n-1$, $\delta_1 = y_1 \geq 0$. Будем предполагать, что $\delta_{i+1} \geq 0$, $i = 1, \dots, n-1$.

Для упрощения анализа примем, что функции затрат с достаточной точностью аппроксимируются квадратичной функцией: $\omega_i(\delta_i, r_i) = e_i \delta_i^2 / 2r_i$, где $e_i > 0$. В функциях отражено следующее свойство: чем больше величина r_i , тем меньше значение затрат, т.е. чем больше резерв для энергоэффективности, тем меньше для агента требуется усилий.

Опишем порядок принятия решений участниками в рассматриваемой модели системы стимулирования.

Сначала УО устанавливает механизм $\mu = \{\sigma(\cdot), \mathcal{G}(\cdot, \cdot), x(\cdot)\}$, включающий в свой состав функции поощрения $\sigma(\cdot)$, функцию штрафов $\mathcal{G}(\cdot, \cdot)$ за невыполнение плана по энергосбережению и правило $x(\cdot) = (x_1(\cdot), \dots, x_n(\cdot))$ формирования планов x_i на основании имеющейся информации ρ_i о параметрах r_i , $i = 1, \dots, n$.

Таким образом, под механизмом стимулирования эффективности в рассматриваемой системе будем понимать совокупность связанных между собой процедур планирования, функций поощрения и функций штрафов.

Затем агенты сообщают в УО оценки ρ_i параметров r_i , на основании которых назначаются планы энергосбережения $x_i = x_i(\rho_i)$ в соответствии с установленными процедурами $x_i(\cdot)$. Наконец, агенты реализуют мероприятия по энергосбережению и обеспечивают его уровень y_i . На основании этого агенту назначаются поощрения $\sigma_i(y_{i-1}, y_i)$ и штрафы $\mathcal{G}_i(x_i, y_i)$ по установленным функциям $\sigma_i(\cdot, \cdot)$ и $\mathcal{G}_i(\cdot, \cdot)$.

Пусть показатель эффективности механизма стимулирования определяется как гарантированное значение целевой функции ОУ на множествах

$$K(\mu, r) = \inf_{\rho \in R(r)} \inf_{y \in Y(x(\rho))} \Phi(x(\rho), y, r),$$

где $R(r)$ – множество рациональных стратегий агента при выборе сообщений $\rho = (\rho_1, \dots, \rho_n)$, $Y(x)$ – множество рациональных стратегий агентов при выборе значений $y = (y_1, \dots, y_n)$ при за-

данном плане $x = (x_1, \dots, x_n)$. Далее будем рассматривать механизмы, для которых множество $R(r)$ состоит из доминантных стратегий агентов, т.е. для каждого агента существуют сообщения, доставляющие максимум его целевой функции независимо от сообщений других агентов. Множество $Y(x)$ определяется заданной последовательностью выбора показателей y_i в соответствии с нумерацией, когда i -й агент максимизирует свою целевую функцию при известных плане и показателе y_{i-1} предшествующего агента. Более детально множества рациональных стратегий описаны ниже при построении оптимального механизма и формулировке результатов статьи.

Постановка задачи определения оптимального механизма стимулирования.

Определить механизм μ^* , такой что для всех значений параметра $r \in [r^H, r^B]$ справедливо

$$K(\mu^*, r) \geq \sup_{\mu \in M} K(\mu, r) - \varepsilon,$$

где M – заданное компактное множество допустимых механизмов, $\varepsilon > 0$.

Пусть множество M определено следующими ограничениями на функции поощрения, функции штрафов и процедуру планирования:

– функции поощрения $\sigma_i(y_i)$ являются кусочно-непрерывными и $0 \leq \sigma_i(y_i) \leq g_i$;

– функции штрафов $\vartheta_i(x_i, y_i)$ также кусочно-непрерывны и удовлетворяют ограничению «максимального роста», $\vartheta_i(x_i, y_i) - \vartheta_i(x_i, y_i') \leq \theta_i(y_i', y_i)$, где $\theta_i(y_i', y_i)$ – заданный показатель максимального роста штрафов [6], удовлетворяющий неравенству «треугольника»: $\theta_i(y_i', y_i) + \theta_i(y_i, x_i) \geq \theta_i(y_i', x_i)$;

– процедуры планирования $x_i(\rho_i)$ – непрерывные функции, $i = 1, \dots, n$.

В [5, 6] доказано, что при этих условиях приведенная выше задача определения оптимального механизма μ^* может быть сведена к задаче оптимизации

$$(1) \quad K(\mu^*, r) = \max_{\mu \in M_c} \Phi(x(r), x(r), r) =$$

$$= \max_{\mu \in M_c} \{c_1 y_1 - v_1(y_1, r_1) + \sum_{i=2}^n [c_i (x_i - x_{i-1}) - v_i(x_i, r_i)]\},$$

где M_c – компактное множество допустимых механизмов, определяемое дополнительными условиями согласования, которым должна удовлетворять процедура планирования $x(\rho)$ и система стимулирования $\sigma(\cdot)$, $\mathcal{A}(\cdot, \cdot)$ для побуждения агентов выполнять планы и сообщать в УО достоверную информацию о своих параметрах как доминантные стратегии. Компактность множеств M_c для рассматриваемой модели системы доказана в [5, 6].

Таким образом, задача определения механизма сводится к определению множества M_c и решению задачи (1). Условия согласования, определяющие множество M_c , при котором достигается максимальное значение показателя $K(\mu^*, r)$, будут представлены ниже в процессе формулировки результатов решения задачи (1). В [6] показано, что выполнение условий согласования свойственно оптимальному механизму и стимулирует агента на *выполнение* плана и сообщение в УО *достоверной* информации.

Условия согласования, обеспечивающие выполнение плана и сообщение достоверной информации.

Рассмотрим сначала ограничения, задаваемые на множество механизмов, при которых агенты выполняют планы.

Выполнение планов может быть обеспечено за счет штрафов за отклонение состояния агента от плана. В [6] показано, что для рассматриваемого здесь множества допустимых функций штрафа оптимальными являются штрафы, совпадающие с показателем их максимального роста $\theta_i(x_i, y_i)$.

Множество $P_i(y_{i-1}, r_i)$ планов, выполнение которых максимизирует целевые функции агентов, определяется выражением $P_i(y_{i-1}, r_i) = \{x_i \mid f_i(x_i, x_i, y_{i-1}, r_i) \geq f_i(x_i, y_i, y_{i-1}, r_i), x_i, y_i \in [0, r_i^B]\}$.

В [6] показано, что для рассматриваемых функций штрафа $\theta_i(x_i, y_i)$, удовлетворяющих «неравенству треугольника», множество $P_i(y_{i-1}, r_i)$ совпадает с множеством $Y_i(y_{i-1}, r_i) = \text{Arg} \max_{y_i \in [0, r_i]} f_i(x_i, y_i, y_{i-1}, r_i)$ рациональных стратегий i -го

агента: $Y_i(y_{i-1}, r_i) = P_i(y_{i-1}, r_i)$. Условие $x_i \in P_i(y_{i-1}, r_i)$ называется условием максимального согласования (МС).

Определим для каждого агента множества $P_i(y_{i-1}, r_i^H)$ планов, которые при функции штрафов $\theta_i(x_i, y_i)$, будут выполнимы при минимальном значении неопределенного параметра r_i^H . Будем считать, что для r_i^H выполнение устанавливаемого плана обеспечивается штрафами $\theta_i(x_i, y_i)$, при этом функция поощрения равна 0. Максимальное значение плана $x_i^c = x_i^c(y_{i-1}, r_i^H)$ в множестве $P_i(y_{i-1}, r_i^H)$ определяется условием выполнения неравенства

$$(2) \quad \theta_i(x_i^c - y_{i-1}, y_i - y_{i-1}) \geq \omega_i(y_i - y_{i-1}, r_i^H) - \omega_i(x_i^c - y_{i-1}, r_i^H)$$

для всех y_i из отрезка $0 \leq y_i \leq r_i^H$.

Сообщение агентами достоверной информации обуславливается выполнением условий совершенного согласования, т.е. агенту назначаются планы, при которых целевые функции агента достигают максимума на множестве допустимых планов. Показано, что оптимальную процедуру планирования достаточно искать среди процедур, удовлетворяющих условиям совершенного согласования. При определении оптимальных процедур планирования будем руководствоваться этим выводом. В соответствии с этим воспользуемся методикой определения оптимальных механизмов, представленной в [5, 6].

Условия (2) и условия совершенного согласования определяют множество согласованных планов M_c .

Оптимальный механизм.

Заметим, что функция

$$\begin{aligned} \Phi(x, x, r) &= c_1 x_1 - v_1(x_1, r_1) + \sum_{i=1}^n [c_i(x_i - x_{i-1}) - v_i(x_i, r_i)] = \\ &= (c_1 + a_1)x_1 - a_1 r_1 + \sum_{i=2}^n [(c_i + a_i)(x_i - x_{i-1}) - a_i r_i] \end{aligned}$$

возрастает по $(x_i - x_{i-1})$. Поэтому при заданных фондах поощрения $g = (g_1, \dots, g_n)$ достаточно обеспечить получение максимального значения каждого из слагаемых целевой функции УО.

Введем в рассмотрение числа $\gamma_i > 0$ и соответствующие им неравенства $(c_i + a_i)(x_i - x_{i-1}) - a_i r_i \geq \gamma_i$. Из этого неравенства

определим множество планов, при которых величина слагаемых в целевой функции УО не меньше соответствующего значения γ_i . Это множество определяется неравенством $x_i \geq q_i(x_{i-1}, \gamma_i, r_i) = x_{i-1} + (\gamma_i + a_i r_i)/(c_i + a_i)$.

Рассмотрим процедуру планирования, имеющую вид

$$(3) \quad \tilde{\pi}_i(\gamma_i, \rho_i, x_{i-1}) = \begin{cases} x_i^c = x_i^c(x_{i-1}, r_i^H), & \text{если } r_i^H \leq \rho_i \leq \beta_i, \\ q_i(x_{i-1}, \gamma_i, \rho_i), & \text{если } \beta_i < \rho_i \leq r_i^B, \end{cases}$$

где значение β_i определяется из решения уравнения $x_i^c(x_{i-1}, r_i^H) = q_i(x_{i-1}, \gamma_i, \beta_i)$, $i = 1, \dots, n$.

Для процедуры планирования вида (3) определим функции поощрения $\sigma_i(x_{i-1}, y_i)$, для которых выполняются условия совершенного согласования при $y_i = x_i = \pi_i(\gamma_i, \rho_i, x_{i-1})$.

Как следует из [6], такая функция поощрения вычисляется по формуле

$$\sigma_i(x_{i-1}, y_i) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq y_i \leq x_i^c, \\ \int_{x_i^c - x_{i-1}}^{y_i - x_{i-1}} \omega'_i(t, \tilde{r}_i(\gamma_i, t)) dt & \text{при } x_i^c < y_i \leq q_i(x_{i-1}, \gamma_i, r_i^B), \\ \bar{g}_i & \text{при } q_i(x_{i-1}, \gamma_i, r_i^B) < y_i \leq r_i^B. \end{cases}$$

В этом выражении $\tilde{r}_i(\gamma_i, t)$ обозначает обратную функцию к функции $\tilde{\pi}_i(\gamma_i, \rho_i, x_{i-1})$ по отношению к аргументу ρ_i , $\omega'_i(t, \tilde{r}_i(\gamma_i, t))$ обозначает частную производную по первой переменной функции затрат агента $\omega_i(t, r_i)$, значение \bar{g}_i определяется по формуле

$$\bar{g}_i = \int_{x_i^c - x_{i-1}}^{q_i(x_{i-1}, \gamma_i, r_i^B) - x_{i-1}} \omega'_i(t, \tilde{r}_i(\gamma_i, t)) dt.$$

Максимальное значение целевой функции УО обеспечивается при максимальных значениях параметров γ_i , которые достигаются при полном использовании фондов поощрения $g = (g_1, \dots, g_n)$.

Предположим, что функции штрафов «линейны», а именно, $\theta_i(x_i, y_i) = k_i |y_i - x_i|$.

Вычислим $x_i^c = x_i^c(y_{i-1}, r_i^H)$ из условия (2). Для рассматриваемых функций штрафов условие (2) эквивалентно условию $\left. \frac{d\omega_i(x, r_i^H)}{dx} \right|_{x=x_i^c} = e_i(x_i^c - x_{i-1}) / r_i = k_i$. Отсюда получаем

$$x_i^c = x_{i-1} + r_i k_i / e_i.$$

Параметр β_i в выражении (3) определяется из условия $x_i^c(x_{i-1}, r_i^H) = x_{i-1} + (\gamma_i + \alpha_i \beta_i) / (c_i + a_i)$. Отсюда получаем $\beta_i = [(x_i^c(x_{i-1}, r_i^H) - x_{i-1})(c_i + a_i) - \gamma_i] / a_i = r_i k_i (c_i + a_i) / (e_i a_i) - \gamma_i / a_i$.

Тогда выражение (3) для процедуры планирования приобретает вид

$$(4) \quad \tilde{\pi}_i(\gamma_i, \rho_i, x_{i-1}) = \begin{cases} x_{i-1} + r_i^H k_i / e_i, & \text{если } r_i^H \leq \rho_i \leq \beta_i, \\ x_{i-1} + (\gamma_i + a_i r_i^B) / (c_i + a_i), & \text{если } \beta_i \leq \rho_i \leq r_i^B. \end{cases}$$

Определим функцию $\tilde{r}_i(\gamma_i, t)$, обратную к $\tilde{\pi}_i(\gamma_i, \rho_i, x_{i-1})$ на интервале $(x_i^c(x_{i-1}, r_i^H) - x_{i-1}, (\gamma_i + a_i r_i^B) / (c_i + a_i))$. Имеем $\tilde{r}_i(\gamma_i, t) = (t - x_{i-1})(c_i + a_i) / a_i - \gamma_i / a_i$. Отсюда получаем выражение для функции поощрения, при использовании которой процедура планирования (4) удовлетворяет условиям совершенного согласования [6]

$$\sigma_i(x_{i-1}, y_i) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq y_i \leq x_{i-1} + r_i^H k_i / e_i, \\ (y_i - x_{i-1} - r_i^H k_i / e_i) a_i e_i / (c_i + a_i) & \\ \text{при } x_{i-1} + r_i^H k_i / e_i < y_i \leq (\gamma_i + a_i r_i^B) / (c_i + a_i), & \\ g_i & \text{при } (\gamma_i + a_i r_i^B) / (c_i + a_i) < y_i \leq r_i^B. \end{cases}$$

Определим оптимальное значение параметра γ_i^* из условия использования фонда поощрения:

$$g_i = [(\gamma_i^* + a_i r_i^B) / (c_i + a_i) - r_i^H k_i / e_i] a_i e_i / (c_i + a_i).$$

Отсюда получаем $\gamma_i^* = [g_i(c_i + a_i) / a_i e_i + r_i^H k_i / e_i] - a_i r_i^B$ и, соответственно, оптимальное значение целевой функции УО

$$\Phi(x^*, x^*, r) = \sum_{i=1}^n \gamma_i^*.$$

Обратим внимание на то, что в построенном оптимальном механизме агентам назначаются «выгодные» для них планы на основе сообщаемой ими информации. Поэтому УО может полу-

чать от агентов вместо оценок $\rho_i = r_i$ непосредственно значения планов x_i в предположении, что агенты могут сами такие планы вычислить. В этом случае рассмотренный механизм обретает черты механизма с встречным планированием [8].

Оптимальный механизм с встречным планированием.

Поскольку для рассматриваемого механизма выполнены условия максимального и совершенного согласования, выбираемые агентами уровни энергоэффективности совпадают с установленными им планами, $y_i = x_i$, и агенты заинтересованы сообщать достоверную информацию, $\rho_i = r_i$. При этом $r_i = (x_i - x_{i-1})(c_i + a_i) / a_i - \gamma_i / a_i$. Подставив это выражение в формулу для функции поощрения и учитывая $y_i = x_i$, имеем для функции стимулирования на отрезке, задаваемом неравенствами $x_{i-1} + r_i^* k_i / e_i < y_i \leq (\gamma_i + a_i r_i^*) / (c_i + a_i)$, выражение $A_i(x_i - x_{i-1}) - k_i |y_i - x_i|$, где $A_i = [a_i e_i - k_i(c_i + a_i + \gamma_i^*)] / (c_i + a_i)$.

Функция стимулирования, имеющая вид $A_i(x_i - x_{i-1}) - k_i |y_i - x_i|$, в совокупности с процедурой планирования, при которой агенты вместо параметров ρ_i сообщают планы, соответствует механизму с встречным планированием [8]. Действительно, при встречном планировании агенты сообщают в УО вместо параметров ρ_i выгодные им планы, а УО стимулирует агентов с целью обеспечить им выгодность «наиболее напряженных» планов при заданных ограничениях на фонды поощрения.

Таким образом, мы проиллюстрировали оптимальность механизма с встречным планированием.

2.2. ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Применение описанных выше механизмов отбора проектов, их ресурсного обеспечения и стимулирования энергоэффективности приводит к необходимости внесения дополнений в структуру управления инновационной деятельностью в организации.

Выделим два режима управления, в составе которых используются указанные механизмы. Назовем их режимами стратегического и оперативного управления. Соответственно им в

организационной структуре формируются блоки стратегического и оперативного управления.

В состав режима стратегического управления включаются решения следующих задач:

- классификация и отбор наиболее перспективных проектов (пример методов решения этих задач приведен выше в разделе 2) первой части статьи;

- выделение финансовых ресурсов на реализацию проектов и формирование заданий для блока оперативного управления по разработке финансовых моделей и бизнес-планов по их реализации (для решения этой задачи может быть применена модификация метода «затраты–эффект», описанного в разделе 3 статьи [3]);

- разработка и утверждение механизмов стимулирования реализацией комплекса проектов (пример механизма стимулирования для цепочки работ по проекту описан в разделе 2.1 настоящей статьи).

В состав режима оперативного управления включается решение следующих задач:

- мониторинг выполнения проектов и выработка корректирующих воздействий;

- предоставление в блок стратегического управления информации по изменениям и появлению инноваций по теме выполняемых проектов;

- разработка финансовых моделей и бизнес-планов по реализации отобранных проектов;

- разработка календарных планов;

- реализация механизмов стимулирования.

Использование описанных выше механизмов вызывает необходимость изменений в существующей структуре управления организаций.

Укажем два аспекта, которые можно учесть в структуре управления.

Первый аспект заключается в том, что в структуру, относящейся к стратегическому управлению, рекомендуется включить подразделения (либо ответственные лица), курирующие различные уровни описанной выше комплексной оценки (рис. 2).

В левой части рисунка изображена структура комплексной оценки, рассмотренная в разделе 2 статьи [3], в правой части рисунка представлены элементы иерархической структуры управления, ответственные за осуществление комплексной и промежуточных оценок проектов и их мониторинг. Так, например, элемент с номером 1 призван отвечать за расчет итоговых оценок проектов и контроль за их изменением во времени, элемент 2, подчинен элементу 1 и предназначен для выполнения промежуточной оценки проектов и их мониторинг согласно промежуточному оцениванию Е. Аналогично распределяется ответственность элементов иерархической структуры с номерами 3 и 4 в соответствии с промежуточными оценками Г и Д.

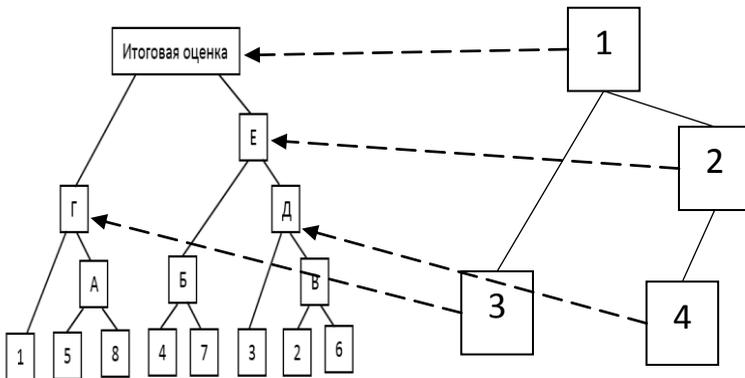


Рис. 2. Пример включения элементов оценки эффективности в структуру управления проектами

Второй аспект корректировки структуры управления определяется описанным в разделе 3 первой части статьи [3] механизмом распределения ресурсов по группам проектов.

Большие организации типа холдинга РЖД, как правило, имеют сложные территориальное и функционально распределенные структуры. Поэтому при формировании программы инновационного развития важно учитывать интересы всех основных структурных подразделений. В противном случае однобокость инновационной стратегии приведет в перспективе

к снижению эффективности всей системы. Рассмотрим задачу согласованного формирования инновационной программы, в которой каждому основному структурному подразделению гарантируется определенное участие в программе. Выделим два типа гарантий (условий согласования).

1. Согласование по ресурсу: каждому структурному подразделению гарантируется не менее определенной величины средств на инновационное развитие.

2. Согласование по эффекту: каждому структурному подразделению гарантируется включение в программу проектов с суммарным эффектом не менее определенной величины.

Заметим, что согласование по эффекту имеет значительно большую степень манипулирования (сознательного искажения информации), чем согласование по ресурсу. Действительно, подразделение, уверенное во включении в программу проектов с эффектом не менее гарантированного, будет заинтересовано в завышении затрат на проекты.

Условие согласования по ресурсу, наоборот, стимулирует включение в программу наиболее эффективных проектов. Поэтому далее будем рассматривать условие согласования по ресурсу.

Метод распределения финансовых средств, в принципе, аналогичен описанному в разделе 3 статьи [3]. Он состоит из двух этапов.

I этап. Для каждого подразделения, участвующего в программе, отбирается по алгоритму из раздела 3 минимальное множество проектов при финансировании не менее гарантированного.

II этап. Применяется алгоритм, описанный в разделе 3 первой части статьи, ко всему множеству проектов.

В соответствии с распределением финансирования между комплексными проектами рассматриваемой сетевой мультипроектной системы определяется состав проектных офисов (ПО) иерархической структуры управления (рис. 3).

На рис. 3 аббревиатура ЦО обозначает центральный проектный офис, номерами 1, 2, 3, ..., n помечены проекты в мультипроектной системе. В качестве иллюстрации проекты под

номера 1, 2, 5, 6 объединены в группу проектов, получивших первый приоритет при распределении финансовых ресурсов по процедуре «затраты–эффект», рассмотренной в разделе 3 первой части статьи; под номерами 3, 4, 7 обозначена группа проектов, получивших второй приоритет и, наконец, последняя группа проектов, получившая финансирование, включает 4 проекта, включая проект с номером n .

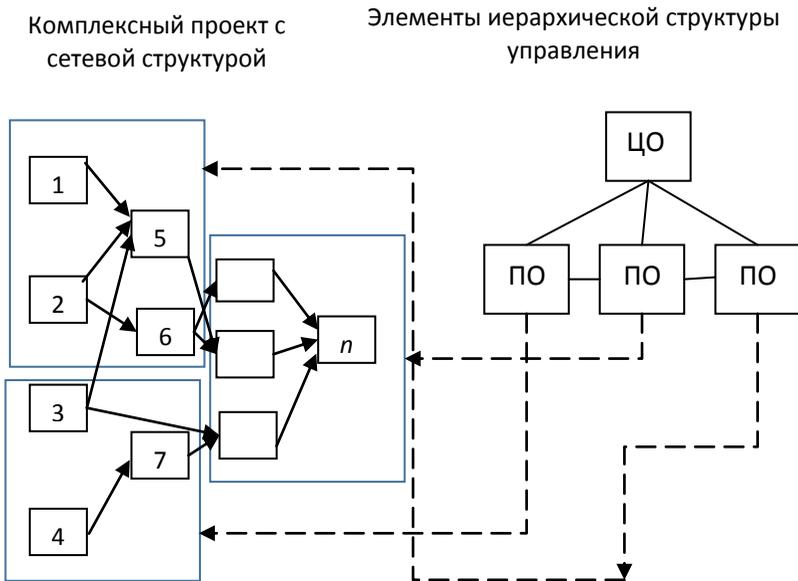


Рис. 3. Пример формирования проектных офисов в структуру управления

Представленные предложения по внесению дополнений в структуру управления направлены на повышение результативности исследования, разработок и внедрения наиболее перспективных проектов. Они могут служить дополнительными инструментами по реализации стандартов [15–18] и системы управления научно-технической деятельностью [11–14], принятых в организации.

3. Заключение

На основе предложенных системы комплексного оценивания и механизма распределения инвестиций может формироваться матрица ответственности в системе управления реализацией комплексных проектов в организации. Модели оценки и определения приоритетных проектов, а также механизма распределения финансовых ресурсов на основе выделения наиболее эффективных проектов способствуют концентрации ресурсов на наиболее приоритетных направлениях научно-технического развития.

Представленная модель системы отбора проектов и их группировки в мультипроектные комплексы может служить основой дальнейшего формирования процессных моделей управления жизненным циклом научно-технических и инновационных разработок.

Исследованные модели дают основу для формирования проектных офисов для управления реализацией комплексных проектов, а модели механизмов стимулирования могут составить основу положений о стимулировании научной, опытно-конструкторской и внедренческой деятельности коллективов исследователей и разработчиков.

В совокупности представленные модели механизмов реализуют пример комплексного механизма управления разработками сложных проектов.

Литература

1. БЕЛОВ М.В., НОВИКОВ Д.А. *Сетевые активные системы: модели планирования и стимулирования* // Проблемы управления. – 2018. – №1. – С. 47–57.
2. БУРКОВ В.Н., ЕНАЛИЕВ А.К. *Оптимальность принципа открытого управления. Необходимые и достаточные условия достоверности информации в активных системах* // Автоматика и телемеханика. – 1985. – №3. – С. 73–80.

3. БУРКОВ В.Н., ЕНАЛЕЕВ А.К., СТРОГОНОВ В.И., ФЕДЯНИН Д.Н. *Модели и структура управления разработкой и внедрением инновационных средств и технологий. I. Механизмы отбора приоритетных проектов и распределения ресурсов.* // Управление большими системами. – 2018. – №74. – С. 81–107.
4. БУРКОВ В.Н., НОВИКОВ Д.А. *Как управлять организацией.* – М.: Синтег, 2004. – 400 с.
5. ЕНАЛЕЕВ А.К. *Оптимальный механизм функционирования в активной системе с обменом информацией* // Управление большими системами. – 2010. – №29. – С. 108–127.
6. ЕНАЛЕЕВ А.К. *Оптимальность согласованных механизмов функционирования в активных системах* // Управление большими системами. – 2011. – №33. – С. 143–166.
Англ.: ENALEEV A.K. *Optimal incentive-compatible mechanisms in active systems* // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74(3). – P. 491–505.
7. ЕНАЛЕЕВ А.К. *Оптимальный согласованный механизм в системе с несколькими активными элементами* // Проблемы управления. – 2015. – №3. – С. 20–28.
Англ.: ENALEEV A.K. *Optimal incentive compatible mechanism in a system with several active elements* // Automation and Remote Control. – 2017. – Vol. 78(1). – P. 146–158.
8. *Механизмы управления* / Под ред. Д.А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2011. – 192 с.
9. НОВИКОВ Д.А. *Сетевые структуры и организационные системы.* – М.: ИПУ РАН, 2003. – 101 с.
10. НОВИКОВ Д.А., ЦВЕТКОВ А.В. *Механизмы стимулирования в многоэлементных организационных системах.* – М.: Апостроф, 2000 – 184 с.
11. *Положение ОАО «РЖД» от 25.05.2009 №53 (ред. От 24.10.2017) «Положение о Департаменте технической политики открытого акционерного общества «Российские железные дороги».* – URL: <https://jd-doc.ru/2009/maj-2009/7782-polozhenie-oao-rzhd-ot-25-05-2009-n-53>.

12. *Распоряжение ОАО «РЖД» от 30.10.2015 № 2596р « Об утверждении Положения о порядке разработки и выполнения программы инновационного развития холдинга «РЖД».* – URL: www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=651275.
13. *Распоряжение ОАО «РЖД» от 29.08.2016 № 1761р « Об утверждении Положения о Центре инновационного развития – филиале открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (вместе с Положением).*
14. *Распоряжение ОАО «РЖД» от 12.09.2014 № 2168р (ред. от 09.08.2016) «О распределении функций в системе управления технико-технологическим развитием, инновационной деятельностью и обеспечением безопасности производственных процессов в холдинге «РЖД».*
15. *СТО РЖД 08.007-2011. Стандарт ОАО «РЖД». Инновационная деятельность а ОАО «РЖД». Управление реализацией научно-технических работ (утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 26.06.2012 №1267р).* – URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6027.
16. *СТО РЖД 08.015-2011. Стандарт ОАО «РЖД». Инновационная деятельность в ОАО «РЖД». Порядок рассмотрения инновационных проектов (утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 26.06.2012 №1267р).* – URL: <http://lawru.info/dok/2012/06/26/n170829.htm>.
17. *СТО РЖД 08.005-2011. Стандарт ОАО «РЖД». Инновационная деятельность в ОАО «РЖД». Порядок оценки эффективности инновационных проектов (утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 26.06.2012 №1267р).* – URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6024.
18. *СТК 1.04.001 Стандарт по качеству ОАО «РЖД». Управление проектами ОАО «РЖД». Основные Положения.* – URL: <https://jd-doc.ru/2009/sentyabr-2009/7447-standart-po-kachestvu-oao-rzhd-n-stk-1-04-004-ot-14-09-2009-g-n-1902r>.

19. BAYIZ M., CORBETT C.J. *Coordination and Incentive Contracts in Project Management under Asymmetric Information* // December 15, 2005. – 32 p. – URL: <https://ssrn.com/abstract=914227>. – DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.914227>.
20. CLEDEN D. *Managing project uncertainty* // Routledge. – 2017. – 146 p.

MODELS AND MANAGEMENT STRUCTURE OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION. II. MODEL OF THE ENERGY EFFICIENCY STIMULATION MECHANISM AND THE ELEMENTS OF THE PROJECT MANAGEMENT STRUCTURE

Vladimir Burkov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Doctor of Science, chief researcher (vlab17@bk.ru).

Anver Enaleev, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, PhD, senior researcher (anverena@mail.ru).

Vladimir Stroganov, NIIS, Moscow, Doctor of Science (v.stroganov@vniias.ru)

Abstract: The article consists of two parts. We continue a study of the mechanisms for managing the implementation of complex projects that ensure energy efficiency at the second part of the article. We consider a model for stimulating energy efficiency in the sequence of projects in a multi-project structure and propose the optimal mechanism for this model. This mechanism includes a planning procedure, fines for non-compliance with plans, and a reward function for project results. The article consider the functioning of the system as a game of the Center and successively connected agents implementing projects. The strategy of the Center is to choose a mechanism. Agent strategies are messages to the Center for data about their parameters and selection of the project results. Information about the parameters of the agents is necessary to calculate the plans based on the planning procedure. At the same time, agents may report corrupted data. We show that the proposed optimal mechanism encourages agents to provide reliable information and select results that coincide with the plans. Taking into account the results of the study of the mechanisms of project evaluation and budget allocation, discussed in the first part of the article, we propose approaches to forming the structure of the management system for the implementation of complex projects.

Keywords: energy efficiency, funds allocation, incentives, control, management structure, organization.

УДК 06.35.51; 73.01.77; 73.01.21

ББК 65

DOI: 10.25728/ubs.2018.76.7

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии С.А. Баркаловым.*

Поступила в редакцию 18.04.2018.

Опубликована 30.11.2018.

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ УПОРЯДОЧИВАНИЯ ПЕРЕЧНЯ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ

Базовкин А. В.¹

(СамараНИПИнефть, Самара)

Рассматривается проблема, стоящая перед нефтегазодобывающими предприятиями, связанная с оптимальным распределением по месяцам календарного года технических мероприятий, направленных на поддержание добычи нефти и газа. В статье даётся математическая постановка данной задачи, которая предусматривает равномерность распределения таких мероприятий по году, монотонное убывание их стартовых дебитов, возможность запрета проведения мероприятий в отдельные месяцы (например, в силу дорожных условий), а также возможность жёстко зафиксировать месяц проведения отдельных мероприятий в силу производственных причин. Предлагаемая в статье математическая постановка данной задачи представляет собой задачу нелинейного булева программирования. Для её решения предложен гибридный стохастическо-эвристический алгоритм. Стохастический подход реализован на этапе формирования матрицы распределения числа мероприятий по месяцам года, а эвристический – на этапе распределения конкретных мероприятий по месяцам года. В завершении статьи приведены результаты тестовых расчётов.

Ключевые слова: производственное планирование, оптимизация, перечень ГТМ, нелинейное программирование.

1. Введение

Для поддержания добычи нефти и газа на более высоком уровне при разработке месторождений обычно проводится комплекс геолого-технических мероприятий (ГТМ). Эти мероприятия могут быть направлены на интенсификацию притока к скважине, на вовлечение новых дренируемых запасов, на поддержание пластового давления и т.д. Перечень ГТМ формируется на основе анализа текущего состояния разработки пласта, технического состояния скважин, экономической эффективности и других существенных факторов [1, 2, 4–6]. Для обеспечения качественного планирования производственных показателей в добывающей компании перечень ГТМ формируется на годы

¹ Андрей Владимирович Базовкин, к.ф.-м.н. (BazovkinAV@samnipineft.ru).

вперёд и насчитывает иногда тысячи мероприятий. На предварительном этапе обычно для большинства мероприятий задаётся только год их выполнения. Определение точных дат проведения отдельных мероприятий является одним из заключительных «штрихов» при формировании перечня. В настоящей работе рассматривается проблема распределения мероприятий по месяцам года и предлагается математический метод её решения.

2. Постановка задачи

2.1. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Пусть имеется предприятие, занимающееся добычей углеводородного сырья. Внутри данного предприятия выделены подразделения, называемые цехами добычи, которые ведут свою деятельность на закреплённых за ними месторождениях.

Пусть имеется перечень ГТМ, который включает о каждом мероприятии информацию: номер цеха добычи, стартовый дебит нефти (прирост дебита), дата проведения – точная или с указанием одного только года. Будем полагать, что стартовый дебит нефти есть известная величина, не зависящая от даты проведения мероприятия (в пределах указанного года). Обычно перечень ГТМ содержит мероприятия различного типа: бурение скважин и боковых стволов, изменение интервалов перфораций, гидроразрыв пласта, вывод скважины из бездействия и т.д. Требуется упорядочить мероприятия каждого типа по соответствующему году так, чтобы:

- по каждому цеху добычи ГТМ одного типа были распределены равномерно в течение года;
- среднемесячный стартовый дебит нефти по добывающему предприятию монотонно убывал в течение года.

Под «среднемесячным стартовым дебитом» понимается среднее арифметическое стартовых дебитов мероприятий, запланированных на данный месяц. Первое условие выглядит естественно в силу того, что для выполнения ГТМ одного типа требуются специализированные бригады рабочих с соответствующим оборудованием. Второе условие вытекает из широко используемой экономической модели, предполагающей, что

рост цен¹ на нефть происходит более медленно по сравнению с процентной ставкой альтернативного безрискового размещения капитала, в связи с чем экономически выгодно иметь более высокую добычу в более ранний период.

Дополнительно предусмотрим возможность запрета проведения мероприятий в определённые месяцы (например, в связи с дорожными условиями). Кроме того, в силу производственных причин иногда дата проведения конкретного мероприятия фиксирована и не может быть изменена. Это обстоятельство также будет учтено.

Отметим, что в рассматриваемой постановке не учитывается стоимость мероприятий. Это связано с тем, что обычно на этапе планирования стоимость мероприятий одного типа предполагается одинаковой и определяется на основе осреднённых показателей. В частности это справедливо для таких типов мероприятий как гидроразрыв пласта, изменение интервалов перфорации, вывод скважины из бездействия, расконсервация скважины. Для мероприятий, связанных с бурением (новые скважины, боковые стволы), стоимость зависит от глубины бурения и длины проходки. В последнем случае может возникнуть необходимость рассмотрения постановки оптимизационной задачи с учётом стоимости работ. Впрочем, если глубины скважин приблизительно равны, то и в этом случае различиями в стоимости работ можно пренебречь.

2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ

Упорядочивание перечня ГТМ будем осуществлять независимо по типам мероприятий и годам их планируемого выполнения. Поэтому будем считать, что далее речь идёт о мероприятиях одного типа, запланированных на один и тот же год. Месяцем выполнения ГТМ назовём месяц даты окончания данного мероприятия. Пусть в перечне ГТМ имеется t мероприятий, месяц выполнения которых в пределах года допустимо варьировать.

¹ Точнее рост чистого денежного потока, включающий не только доход от продажи нефти, но и сопутствующие капитальные, операционные затраты и др.

Обозначим p_i – порядковый месяц в году, в который предлагается выполнение i -го мероприятия. Определим

$$(1) \quad x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } j = p_i, \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

где $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, 12$. Пусть q_i – стартовый дебит нефти i -го ГТМ, тогда среднемесячный стартовый дебит в j -й месяц равен

$$(2) \quad q_j^{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^m x_{i,j} q_i + \sum_{i=1}^m \underline{x_{i,j} q_i}}{\sum_{i=1}^m x_{i,j} + \sum_{i=1}^m \underline{x_{i,j}}},$$

где символы с нижним подчёркиванием относятся к мероприятиям с зафиксированной датой проведения (\underline{m} – общее число таких мероприятий). Задачу упорядочивания перечня можно сформулировать как поиск такой матрицы x с элементами $x_{i,j}$, которая доставляет минимум функционалу

$$(3) \quad F(x) = \sum_{j=1}^{12} (q_j^{\text{cp}} - \tilde{q}_j)^2 \longrightarrow \min$$

где \tilde{q}_j – значения некоторой наперёд заданной монотонно убывающей функции, к виду которой мы бы хотели приблизить распределение средних стартовых дебитов.

Определим

$$(4) \quad y_{i,k} = \begin{cases} 1, & \text{мероприятие } i \text{ выполняется цехом } k, \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

где $k = 1, \dots, N_C, N_C$ – число цехов добычи. Условие равномерности распределения мероприятий в течение года для данного цеха добычи можно записать в виде

$$(5) \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^m x_{i,j} y_{i,k} + \sum_{i=1}^m \underline{x_{i,j} y_{i,k}} \leq \left\lfloor \frac{m_k + m_k}{12 - |R|} \right\rfloor + 1, & \sum_{i=1}^m x_{i,j} y_{i,k} \leq \left\lfloor \frac{m_k + m_k}{12 - |R|} \right\rfloor, \\ \sum_{i=1}^m x_{i,j} y_{i,k} = 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – означает взятие целой части; $m_k = \sum y_{i,k}$ – число мероприятий, выполняемых k -м цехом, месяц проведения которых

дозволено менять в пределах года; $m_k = \sum y_{i,k}$ – число мероприятий, выполняемых k -м цехом и месяц проведения которых фиксирован; R – множество номеров тех месяцев года, в которые мероприятия не могут выполняться в силу технических ограничений; $|R|$ – мощность множества R , т.е. количество содержащихся в нём элементов. Уравнения (3), (5) следует дополнить условиями

$$(6) \quad \sum_{i=1}^m x_{i,r} = 0, r \in R,$$

$$(7) \quad \sum_{j=1}^{12} x_{i,j} = 1.$$

Условие (6) означает запрет проведения мероприятий в указанные месяцы, условие (7) означает, что i -е мероприятие должно быть выполнено в один из месяцев года.

3. Метод решения

Выражение (3) с ограничениями (5)–(7) представляет собой нелинейную оптимизационную задачу. Для решения подобных задач широко используются стохастические [7, 11] и эвристические подходы [3, 8, 9, 10, 12]. Эти методы универсальны в своём применении, но не гарантируют нахождение глобального минимума. Впрочем, обычно они позволяют улучшить некое начальное решение (например, предложенное человеком), что оправдывает их применение с практической точки зрения.

Для решения задачи (3), (5)–(7) разработан гибридный алгоритм, включающий как стохастические, так и эвристические компоненты. На первых двух шагах алгоритма формируется матрица распределения числа мероприятий по месяцам года, элементы которой обозначим $n_{k,j}$ (первый индекс соответствует номеру цеха, второй – порядковому номеру месяца в году). Условие (5) допускает некоторый произвол в распределении мероприятий по месяцам года, поэтому на шаге 2 используется стохастический подход. На шаге 3 происходит распределение мероприятий по месяцам года, так чтобы число распределяемых мероприятий в j -й месяц для цеха k равнялось $n_{k,j}$. На шаге 4 вы-

полняется процедура перестановки мероприятий между месяцами внутри каждого цеха с целью уменьшения целевой функции F .

Шаг 1. Сформируем матрицу месяцев года, в которые за-
прещается распределять мероприятия. Для этого используем рекуррентную процедуру

$$(8) \quad n_{k,j}^{tabu,0} = \begin{cases} 1, & j \in R, \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$(9) \quad N_k^p = \left[\frac{m_k + \left(\frac{m_k}{12} - \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^m x_{i,j} y_{i,k} n_{k,j}^{tabu,p-1} \right)}{12 - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^{tabu,p-1}} \right],$$

$$(10) \quad n_{k,j}^{tabu,p+1/2} = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^m x_{i,j} y_{i,k} > N_k^p, \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$(11) \quad n_{k,j}^{tabu,p+1} = n_{k,j}^{tabu,p+1/2} + n_{k,j}^{tabu,0} - n_{k,j}^{tabu,p+1/2} n_{k,j}^{tabu,0},$$

где N_k^p – среднее арифметическое число мероприятий в месяцах, доступных для распределения. Смысл приведённых формул следующий. На нулевом шаге $n_{k,j}^{tabu,0}$ принимается равным 1 в те месяцы j , в которые запрещено распределять мероприятия по техническим причинам (6). На последующих шагах элементы матрицы $n_{k,j}^{tabu,p}$ дополнительно принимают значения 1 в те месяцы, в которые число априори распределённых мероприятий превышает среднемесячное число мероприятий, причём при определении последнего не учитываются месяцы, запрещённые к распределению мероприятий на предыдущих шагах, т.е. для которых $n_{k,j}^{tabu,p-1} = 1$. Шаг (11) выполняет функцию корректора, восстанавливая выполнение условия (6). Число шагов, необходимое при выполнении процедуры (9)–(11) может составить от 1 до 11, в зависимости от данных задачи, где число 11 соответствует максимальному последовательному исключению 11 месяцев. Для простоты описания алгоритма будем считать, что про-

цедура выполняется 11 раз, при этом, возможно, на последних шагах матрица $n_{k,j}^{tabu,p}$ остаётся неизменной. Обозначим

$$n_{k,j}^{tabu} = n_{k,j}^{tabu,11}, N_k = N_k^{11}.$$

Запретим распределение мероприятий в месяцы j , в которые $n_{k,j}^{tabu} = 1$, что обеспечит выполнение условия (6) и второй части условия (5). Число мероприятий, гарантированно распределяемое в j -й месяц для цеха k :

$$(12) \quad n_{k,j}^0 = \left(\lfloor N_k \rfloor - \sum_{i=1}^m \underline{x_{i,j}} \underline{y_{i,k}} \right) (1 - n_{k,j}^{tabu}).$$

Обнуляем значение счётчика внешних итераций $I_{внеш} = 0$ (смысл переменной $I_{внеш}$ прояснится на шаге 5).

Шаг 2. Для каждого цеха оставшиеся $m_k - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^0$ мероприятий распределяются случайным образом по одному между месяцами, для которых

$$\sum_{i=1}^m \underline{x_{i,j}} \underline{y_{i,k}} \leq N_k \text{ и } n_{k,j}^{tabu} = 0.$$

Таких месяцев достаточно количество, так как число мероприятий, которое необходимо распределить, равно

$$\begin{aligned} m_k - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^0 &= m_k - \sum_{j=1}^{12} \left(\lfloor N_k \rfloor - \sum_{i=1}^m \underline{x_{i,j}} \underline{y_{i,k}} \right) (1 - n_{k,j}^{tabu}) = \\ &= m_k - \left(\lfloor N_k \rfloor \left(12 - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^{tabu} \right) - \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^m \underline{x_{i,j}} \underline{y_{i,k}} (1 - n_{k,j}^{tabu}) \right) = \\ &= m_k - \left(\left\lfloor \frac{m_k + \alpha}{\beta} \right\rfloor \beta - \alpha \right), \end{aligned}$$

где

$$\alpha = m_k - \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^m \underline{x_{i,j}} \underline{y_{i,k}} n_{k,j}^{tabu} = \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^m \underline{x_{i,j}} \underline{y_{i,k}} (1 - n_{k,j}^{tabu}),$$

$$\beta = 12 - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^{tabu}.$$

Теперь нетрудно показать, что $m_k - \left(\left\lfloor \frac{m_k + \alpha}{\beta} \right\rfloor \beta - \alpha \right) \leq \beta$, чем и доказывается существование необходимого числа месяцев для распределения оставшихся мероприятий.

Таким образом, число мероприятий, распределяемых на j -й месяц, равно:

$$(13) \quad n_{k,j} = n_{k,j}^0 + \delta_{k,j},$$

где

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} 0 \vee 1, & \sum_{i=1}^m x_{i,j} y_{i,k} \leq N_k, n_{k,j}^{tabu} = 0, \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^{12} \delta_{k,j} = m_k - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^0.$$

Покажем, что подобное распределение мероприятий по году удовлетворяет первой части условия (5). В соответствии с (12), (13) для месяцев j таких, что $n_{k,j}^{tabu} = 0$, выполняется:

$$(14) \quad \sum_{i=1}^m x_{i,j} y_{i,k} + \sum_{i=1}^m x_{i,j} y_{i,k} = n_{k,j} + \sum_{i=1}^m x_{i,j} y_{i,k} \leq \lfloor N_k \rfloor + 1.$$

Покажем, что последовательность N_k^p , $p=1, \dots, 11$ монотонно не возрастает. Действительно, $N_k^p = \left\lfloor (m_k + \alpha^p) / \beta^p \right\rfloor$, где

$$\alpha^p = m_k - \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^m x_{i,j} y_{i,k} n_{k,j}^{tabu, p-1},$$

$$\beta^p = 12 - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^{tabu, p-1}.$$

Тогда N_k^{p+1} будет иметь вид¹

¹ Другой возможный случай $N_k^{p+1} = N_k^p$ тривиален.

$$N_k^{p+1} = \left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p - \sum_{j=1}^{12} a_j}{\beta^p - \sum_{j=1}^{12} b_j} \right\rfloor, \text{ где}$$

$a_j = \sum_{i=1}^m \underline{x}_{i,j} \underline{y}_{i,k} (n_{k,p_i}^{tabu,p+1} - n_{k,p_i}^{tabu,p})$ – число априори распределённых мероприятий в месяцы, исключаемые на шаге $p + 1$ по формуле (10), $b_j = \sum_{j=1}^{12} (n_{k,j}^{tabu,p+1} - n_{k,j}^{tabu,p})$ – число соответствующих

месяцев. В силу (10) a_j удовлетворяет условию $a_i > N_k^p = \left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p}{\beta^p} \right\rfloor$, откуда

$$N_k^{p+1} = \left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p - \sum_{j=1}^{12} a_j}{\beta^p - \sum_{j=1}^{12} b_j} \right\rfloor \leq \left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p - \left(\left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p}{\beta^p} \right\rfloor + 1 \right) \sum_{j=1}^{12} b_j}{\beta^p - \sum_{j=1}^{12} b_j} \right\rfloor \leq$$

$$\leq \left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p - \frac{m_k + \alpha^p}{\beta^p} \sum_{j=1}^{12} b_j}{\beta^p - \sum_{j=1}^{12} b_j} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p}{\beta^p} \right\rfloor = N_k^p.$$

Из (14) с учётом последнего неравенства имеем

$$\sum_{i=1}^m \underline{x}_{i,j} \underline{y}_{i,k} + \sum_{i=1}^m \underline{x}_{i,j} \underline{y}_{i,k} \leq \lfloor N_k \rfloor + 1 \leq \lfloor N_k^1 \rfloor + 1,$$

что означает выполнение условия (5).

Теперь матрица распределения числа мероприятий по месяцам года $n_{k,j}$ сформирована.

Обнуляем счётчик внутренних итераций $I_{\text{внутр}} = 0$ (смысл переменной $I_{\text{внутр}}$ прояснится на шаге 4).

Шаг 3. На этом шаге происходит случайное распределение мероприятий по месяцам так, чтобы

$$\sum_{i=1}^m \underline{x}_{i,j} \underline{y}_{i,k} = n_{k,j},$$

после чего выполняется вычисление целевой функции $F(x)$.

Шаг 4. Вычисляются изменения значения целевой функции F в случае парных перестановок ГТМ внутри одного цеха добычи. Всего для одного цеха выполняется $m_k(m_k - 1)$ таких вычислений. Для определения изменения целевой функции при перестановке мероприятий вычисления по формуле (3) могут быть упрощены. Учитывая, что при перестановке изменяются средние стартовые дебиты только для двух месяцев, изменение целевой функции можно выразить формулой (промежуточные выкладки опущены)

$$(15) \quad \Delta F^{ij} = F(x^{ij}) - F(x) = b_i(b_i + 2(\tilde{q}_{p_i} - q_{p_i}^{cp})) + b_j(b_j + 2(\tilde{q}_{p_j} - q_{p_j}^{cp})),$$

где x^{ij} получается из x перестановкой строк i и j ; p_i – номер месяца, на который запланирован i -й ГТМ в решении x ;

$q_{p_i}^{cp} = \left(\sum_{s=1}^m q_s x_{s,p_i} + \sum_{s=1}^m \underline{q}_s x_{s,p_i} \right) / \left(n_{p_i} + \sum_{s=1}^m x_{s,p_i} \right)$ – средний стартовый дебит месяца p_i в решении x ;

$$b_i = \frac{q_i - q_j}{n_{p_i}}, \quad b_j = \frac{q_i - q_j}{n_{p_j}}, \quad n_i = \sum_{s=1}^m x_{s,i} = \sum_{k=1}^{N_c} n_{k,i}.$$

Использование формулы (15) требует выполнения 15 арифметических операций вместо $12(m + 4) + 1$ операций при вычислении по формуле (3).

Алгоритм на шаге 4 реализуется следующим образом. Для некоторого цеха k выделяется подмножество мероприятий, соответствующих данному цеху $S^k = \{i \mid y_{k,i} = 1\}$. Для определённости считаем, что мероприятия в этом множестве упорядочены по возрастанию их номеров. Для первого мероприятия, имеющего номер s_1^k , вычисляются значения $\Delta F^{s_1^k s_j^k}$, $j = 1, \dots, m_k$, $s_1^k, s_j^k \in S^k$. Если минимальное из них

$$\Delta F^{s_1^k s_{j_1}^k} = \min_{j=1, \dots, m_k} \Delta F^{s_1^k s_j^k}$$

оказывается меньше нуля, то к решению x применяется соответствующая перестановка $(s_1^k, s_{j_1}^k)$. Эта перестановка приводит к уменьшению целевой функции (3). На основе решения $x^{s_1^k s_{j_1}^k}$

вычисляются значения $\Delta F^{s_2^k s_j^k}$, $j = 1, \dots, m_k$, если минимальное из них оказывается меньше нуля, то к решению применяется соответствующая перестановка $(s_2^k, s_{j_2}^k)$. Такая процедура выполняется последовательно для всех $j = 1, \dots, m_k$, т.е. для всех мероприятий данного цеха.

Описанные действия выполняются поочередно для всех цехов, т.е. для $k = 1, \dots, N_C$. В результате получаем некоторое решение x^* . Если на очередной внутренней итерации алгоритма получено меньшее, чем на предыдущих итерациях, значение целевой функции (3), то соответствующее решение x^* присваивается переменной x^{*4} , используемой для хранения текущего наилучшего решения, полученного на шагах 3-4:

$$x_{I_{\text{внутр}}}^{*4} = \begin{cases} x^*, & I_{\text{внутр}} = 0 \text{ или } F(x^*) < F(x_{I_{\text{внутр}}-1}^{*4}), \\ x_{I_{\text{внутр}}-1}^{*4} & \text{иначе;} \end{cases}$$

где нижний индекс у x^{*4} означает номер внутренней итерации. В конце шага увеличиваем значение счётчика внутренних итераций на 1: $I_{\text{внутр}} := I_{\text{внутр}} + 1$. Если значение счётчика $I_{\text{внутр}}$ не достигло установленной максимальной величины, то возвращаемся на шаг 3, иначе переходим на шаг 5.

Шаг 5. Для шагов 2-5 выполняется внешний цикл итераций. На шаге 5 производится сравнение решения x^{*4} , полученного на шагах 3-4, с лучшим решением x^{*5} , полученным на предыдущих внешних итерациях. Обновляем решение x^{*5} в соответствии с формулой

$$x_{I_{\text{внеш}}}^{*5} = \begin{cases} x^{*4}, & I_{\text{внеш}} = 0 \text{ или } F(x^{*4}) < F(x_{I_{\text{внеш}}-1}^{*5}), \\ x_{I_{\text{внеш}}-1}^{*5} & \text{иначе;} \end{cases}$$

Увеличиваем значение счётчика внешних итераций на 1: $I_{\text{внеш}} := I_{\text{внеш}} + 1$. Если значение счётчика $I_{\text{внеш}}$ не достигло установленной максимальной величины, то возвращаемся на шаг 2, иначе считаем работу алгоритма законченной. Полученное решение x^{*5} будет лучшим в смысле целевой функции (3) из всех построенных в процессе работы алгоритма.

Рассматривалась также модификация алгоритма, в которой шаг 4 выполнялся несколько раз подряд. В результате численных экспериментов отмечено, что обычно достаточно 1-2 вы-

полнений этого шага, большее число повторов увеличивает время вычислений, не приводя к существенному улучшению решения.

4. Результаты расчётов

Работу алгоритма проиллюстрируем на тестовом примере. В основе расчёта лежит перечень ГТМ одного из добывающих обществ нефтяной компании Роснефть, насчитывавший 339 мероприятий одного типа, которые были запланированы на период бизнес-планирования продолжительностью 60 месяцев¹. Отметим, что расчёт для каждого 12-месячного периода выполнялся независимо и, по сути, на рис. 1 представлено пять отдельных расчётов. Число мероприятий для отдельных 12-месячных периодов варьировалось от 64 до 77. Таким образом, число переменных $x_{i,j}$ при решении задачи (3)–(7) составляло от 768 до 924.

Из рисунка видно, что в результате работы алгоритма исходный перечень был модифицирован таким образом, чтобы распределение среднемесячных стартовых дебитов по каждому году стало близко соответствовать целевому распределению, определённого пользователем. В расчёте использовалось 15 внешних итераций, каждая из которых включала 2000 внутренних. При этом время выполнения последовательного программного кода, написанного на языке программирования VBA, составило 254 с на ЭВМ, оснащённой процессором AMD E-450 с тактовой частотой 1,65 ГГц, и 49 с – на ЭВМ, оснащённой процессором Intel U8250 i5 с максимальной тактовой частотой 3,4 ГГц.

Отметим, что поскольку внутренние итерации могут выполняться независимо друг от друга, представленный алгоритм может быть с лёгкостью адаптирован для использования параллельных вычислений.

¹ Всего перечень насчитывал более 2000 мероприятий шести типов.

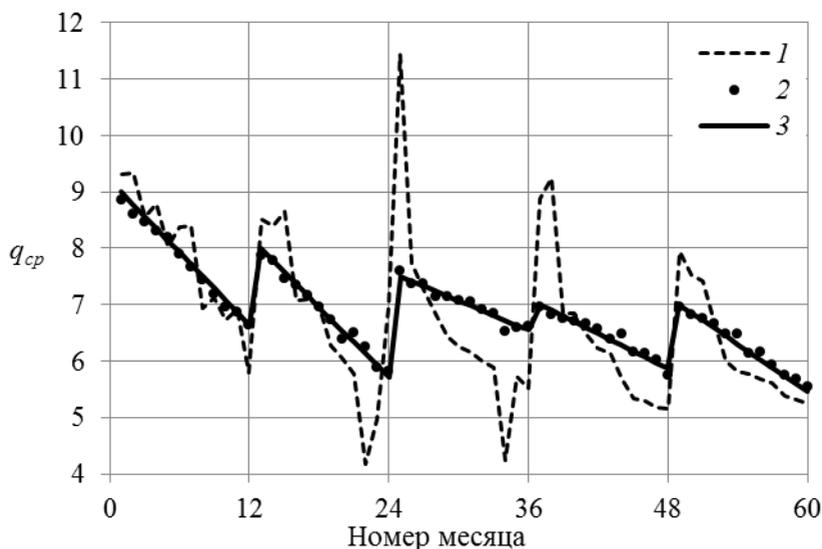


Рис. 1. Средний стартовый дебит: 1 – исходная конфигурация перечня ГТМ; 2 – перечень ГТМ, полученный в результате работы алгоритма; 3 – желаемое распределение стартовых дебитов, указанное пользователем

5. Заключение

С целью оптимизации производственных процессов нефтедобывающего предприятия предложена математическая постановка задачи распределения ГТМ по месяцам года. Для решения задачи был разработан эвристический метод, который был реализован на языке программирования VBA. Созданная программа показала свою эффективность при решении реальных задач, стоящих перед специалистами одного из добывающих обществ нефтяной компании Роснефть.

Литература

1. АНТОНОВ О.Г., НАСЫБУЛЛИН А.В., ЛИФАНТЬЕВ А.В. *Совершенствование методов регулирования разработки нефтяных залежей* // Нефтяная провинция. – 2016. – №3. – С. 87–100.
2. АРТАМОНОВ А.А., АЛЬМУХАМЕТОВ М.А. *Практическая реализация современных подходов планирования ГТМ* // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2013. – №6. – С. 44–48.
3. АСТРАКОВА А.С., БАННИКОВ Д.В., ЛАВРЕНТЬЕВ М.М. (МЛ), ЧЕРНЫЙ С.Г. *Применение генетического алгоритма к задаче оптимального расположения датчиков* // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14, №5. – С. 3–17.
4. АХМЕДОВ К.С. *Методика ранжирования скважин при планировании ГТМ на газодобывающих месторождениях ОАО «Газпром»* // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014. – №5. – С. 40–44.
5. ГИЛАЕВ Г.Г., ПУСТОВОЙ П.А., ЗАХАРЧЕНКО Е.И., СТРЕЛЬЦОВА Ю.Г., КУСОВ Г.В. *Выбор очередности и времени проведения геолого-технических мероприятий* // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – №9. – С. 31–33.
6. ГРАЧЕВ С.И., КОЛМАКОВ А.В. *Методика выбора скважин для проведения геолого-технических мероприятий по поддержанию действующего фонда* // Наука и ТЭК. – 2012. – №2. – С. 11–14.
7. РУБАН А.И. *Глобальная оптимизация методом усреднения координат*. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – 303 с.
8. РУТКОВСКАЯ Д., ПИЛИНСКИЙ М., РУТКОВСКИЙ Л. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы*. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
9. BASK T., SCHWEFEL H.-P. *An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization* // Journal of Evolutionary Computation. – 1993. – Vol. 1, No. 2. – P. 1–20.
10. KENNEDY J., EBERHART R.C. *Swarm Intelligence*. – San Francisco, Morgan Kaufmann, 2001.

11. KIRKPATRICK S., GELATT JR., VECCHI M.P. *Optimization by Simulated Annealing* // Science. – 1983. – Vol. 220, No. 4598. – P. 671–680.
12. KOSHUR V.D., PUSHKARYOV K.V. *Global Optimization via Neural Network Approximation of Inverse Coordinate Mappings* // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2011. – Vol. 20, No. 3. – P. 181–193.

ABOUT ONE METHOD OF OPTIMIZATION WELL INTERVENTIONS LIST

Andrey Bazovkin, SamaraNIPIneft, Samara, Cand.Sc., Chief Specialist (BazovkinAV@samnipineft.ru).

Abstract: To maintain oil and gas production at a higher level, a complex of well interventions is usually use in the petroleum exploration. The list of well interventions is formed on the basis of the analysis of the current state of reservoir development, technical condition of wells, economic efficiency and other significant factors. To ensure quality planning of production indicators in the oil company, the list of well interventions is formed for years ahead and includes, sometimes, thousands of activities. Usually for most events, only one year of their performance is pre-set. It is of interest to study the influence of variation of the well intervention's months performing within a year for economic indicators. This article proposes a mathematical formalization of the problem of ordering the list of well interventions taking into account some production and economic conditions. The formulated problem is the problem of nonlinear optimization. To solve the problem, a heuristic method is proposed, a full description of which is given in the article. In conclusion, the results of optimization for one real example are given.

Keywords: production scheduling, optimization, well intervention list, Non-linear programming.

УДК 519.714.7 + 517.977.5 + 658.5

ББК У9(2)230.37

DOI: 10.25728/ubs.2018.76.8

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Я.И. Квинто.*

Поступила в редакцию 28.11.2017.

Опубликована 30.11.2018.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЕРХНЕЙ ОЦЕНКИ ИЗБЫТОЧНОСТИ ДАННЫХ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВРЕМЕНИ ДОСТУПА МОДУЛЕЙ К БД В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Мирошник С. Н.¹,

*(Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН ФИЦ
«Информатика и управление» РАН, Москва)*

Гончар Д. Р.²

*(Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН
ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва,
Московский физико-технический институт
(государственный университет), Москва)*

Исследуется задача минимизации избыточности информации в БД реального времени, что влияет на время доступа к БД и реализацию модулей. Задан набор программных модулей, которые используют информацию из набора полей, с известной частотой заполняющихся информацией в реальном времени. Задача решена, если работа всех модулей завершена к заданному сроку. Сложность данной постановки задачи и в том, что модули могут быть зависимыми, то есть работают в определенной последовательности, и в том, что на оптимизацию в режиме реального времени выделить достаточные вычислительные ресурсы и время затруднительно. Поэтому решение задачи в разрабатываемой авторами инструментальной САПР систем реального времени разделяется на два этапа: (а) предварительный этап (не в реальном времени), на котором осуществляется формирование групп близких модулей и (б) этап решения задачи в реальном времени, используя выполненную на предварительном этапе оптимизацию расположения полей в файлах. Определяется избыточность информации трёх типов: внутрифайловая, межфайловая, внутримодульная. Предлагается специальная модель спроектированной БД и построены аналитические формулы для вычисления количества неиспользуемых модулями полей.

Ключевые слова: системы управления базами данных, системы реального времени, эвристические алгоритмы, оптимизация.

¹ Сергей Николаевич Мирошник, к.ф.-м.н., н.с. (rtsccas@ya.ru).

² Дмитрий Русланович Гончар, к.т.н., с.н.с. (trpl@ya.ru).

1. Введение

Рассматривается база данных (БД) реального времени, входная информация в которую поступает от датчиков некоторого исследуемого объекта после соответствующей обработки (оцифровки, калибровки и т.д.) N программными модулями. Трудность решения задачи в реальном времени может состоять в том числе в том, что модули из $\{M\}_N$ могут быть зависимыми, т.е. должны работать в определенной последовательности. Это и многое другое накладывает особые требования при проектировании соответствующей структуры БД реального времени, в частности, к такой ее характеристике как избыточность [1, 2, 7, 8]. В данной постановке под избыточностью понимается неиспользуемые модулями поля. Эти поля участвуют в процедуре поиска модулями информации, тем самым увеличивают время доступа модулей к своим полям. Отсюда требования минимизировать такую избыточность.

Отметим, что решение задачи в разрабатываемой авторами инструментальной системе автоматизации проектирования систем реального времени разделяется на два больших этапа.

А. Предварительный этап (не в реальном времени), на котором в том числе осуществляется формирование групп близких модулей.

В. После этого решается задача в реальном времени, используя выполненную на предварительном этапе оптимизацию расположения полей в файлах.

2. Постановка задачи

Задан набор программных модулей $\{M\}_N$ которые используют информацию из набора полей $\{\phi\}_r$. Здесь N – число модулей, r – число полей. Все поля пронумерованы натуральным рядом чисел. Предполагаем, что поля модулей расположены подряд, т.е. занимают связный сегмент в наборе полей. Каждый модуль задан своим первым полем и длиной записи, т.е. числом полей. Здесь не рассматривается случай, когда запись содержит неиспользуемые поля. Поля $\{\phi\}_r$ с известной частотой заполня-

ются информацией в реальном времени. Задача решена, если работа всех модулей завершена и часто к заданному сроку.

Введем некоторые ключевые понятия. Определим избыточность информации трёх типов.

1. *Внутрифайловая избыточность* I_1 образуется из разности длин l_i модуля M_i , входящего в файл F , и длиной L этого файла. Она вычисляется по формуле

$$I_1(F) = Ln - \sum_{i=1}^n l_i,$$

где n – число модулей в файле F .

2. *Межфайловая избыточность* I_2 есть число повторяющихся полей записей L_1, \dots, L_k файлов F_1, \dots, F_k . Она вычисляется по формуле

$$I_2(F_1, \dots, F_k) = \sum_{i=1}^k L_i - r,$$

где r – суммарное число полей всех файлов. Приведённая формула может быть использована для вычисления количества повторяемости используемых полей модулей, входящих в файл F :

$$I_2(F) = \sum_{i=1}^n l_i - L,$$

где n – число модулей в файле F , L – длина файла. Слагаемое L служит для вычисления повторяемости полей. Без L эта формула означает просто число используемых полей файла F . В частности, $I_1(F) + I_2(F)$ есть число полей (используемых и неиспользуемых) всех модулей файла F . Эта сумма не корректна для отдельного файла F , но имеет смысл для набора файлов.

3. *Внутримодульная избыточность* есть число неиспользуемых модулем M полей в записи L модуля.

Для минимизации избыточности предлагается распределять все модули между файлами F_1, \dots, F_k , причем каждый модуль принадлежит только одному файлу.

Вычислим $I_1 = \sum_{i=1}^k I_1(F_i)$ и $I_2(F_1, \dots, F_k)$. Число $I = I_1 + I_2$

является *качеством спроектированной БД*.

Объединение модулей в группы основано на определении *близости модулей* [2–5].

Пусть имеется набор модулей $\{M\}_s$, где s – число модулей в наборе. Включение модуля M_{s+1} в набор $\{M\}_s$ изменяет внутрифайловую избыточность на величину $\Delta I_1 = I_1^{s+1} - I_1^s$, где I_1^s – внутрифайловая избыточность набора $\{M\}_s$, I_1^{s+1} – внутрифайловая избыточность набора $\{M\}_{s+1}$ после включения M_{s+1} в $\{M\}_s$. С другой стороны, важной информацией для близости M_{s+1} к $\{M\}_s$ является количество совпадающих полей модуля M_{s+1} и $\{M\}_s$. Для вычисления совпадающих полей можно воспользоваться формулой, приведённой выше (для $I_2(F)$).

Определение. Модуль M_{s+1} и набор $\{M\}_s$ являются близкими и M_{s+1} может быть включен в состав набора $\{M\}_s$, если

$$\Delta I_1 \leq I_2(M_{s+1}, \{M\}_s).$$

3. Оценка внутрифайловой избыточности

На примере одной группы F вычислим внутрифайловую избыточность I_1 , а именно той ее части, которая влияет на время доступа модулей к своим полям группы F .

Пусть сформирована группа F близких модулей. В этой группе число модулей есть n , и L – число полей, используемых всеми этими модулями. В группе F определим опорный модуль M , для которого l есть наибольшая длина среди длин всех модулей группы, и $\{\phi\}_l$ есть поля, используемых опорным модулем. Разделим набор модулей $\{M\}_n$ группы F на внутренние $\{M\}_v^{in}$ и внешние $\{M\}_w^{out}$. Поля группы F есть $\{\phi\}_L$. Здесь $\{M\}_n = \{M\}_v^{in} \cup \{M\}_w^{out}$. Числа v и w будут вычислены в п. 3.1 и в п. 3.2 соответственно. Далее, для $\{M\}_v^{in} : \{\phi\}_l^{in} = \{\phi\}_l$; $\{\phi\}_L^{out} = \{\phi\}_l^{in} \cup \{\phi\}_d$, $n = v + w$.

Здесь $L = l + d$, где d – допустимое увеличение количества полей опорного модуля M за счет тех полей внешних модулей, которые являются близкими к M .

Воспользуемся приведенными выше формулами для вычисления I_1 и I_2 :

$$I_1 = L \cdot n - \sum_{i=1}^n l_i, \quad I_2 = \sum_{i=1}^n l_i - L.$$

Здесь L – длина набора полей в $\{\phi\}_L$, l_i – длина записи модуля M_i из $\{M\}_n$, $i = 1, \dots, n$, n – число модулей.

Построим оценку той части $\{\phi\}_L$ неиспользуемых модулями из $\{M\}_n$ полей, которые влияют на поиск своих полей в реальном времени. Предполагается, что этот поиск осуществляется с первого поля набора $\{\phi\}_L$. Заметим, что если в БД много групп близких модулей и просуммировать эти части полей, то получим большую задержку времени. Упомянутая оценка неиспользуемых полей состоит из двух частей \tilde{I}_1^{in} и \tilde{I}_1^{out} .

Здесь \tilde{I}_1^{in} – не используемые поля внутренних относительно опорного близких модулей $\{M\}_n^{in}$, соответственно \tilde{I}_1^{out} – для внешних близких модулей $\{M\}_w^{out}$.

Построим аналитические формулы для вычисления обеих частей. Для этого воспользуемся гипотетической моделью, в которой предполагается, что группа модулей $\{M\}_n$ состоит из достаточно большого числа модулей. Это необходимо, чтобы построить верхнюю оценку избыточности I_1 . В этом случае можно найти все модули, близкие к опорному. Выберем из набора $\{M\}_n$ опорный модуль M .

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРИФАЙЛОВОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ \tilde{I}_1^{in}

Вычислим оценку \tilde{I}_1^{in} , обозначающую ту часть полей I_1^{in} , которые «мешают» модулям находить свои поля в группе $\{M\}_n$. Найдем все внутренние близкие модули. Формула для вычисления I_1^{in} всех неиспользуемых полей модулями $\{M\}_n^{in}$ есть

$$I_1^{in} = \tilde{v} \cdot l - \sum_{i=1}^{\tilde{v}} l_i,$$

где \tilde{v} – число внутренних близких модулей, включая опорный, $\tilde{v} = v + 1$, $\sum_{i=1}^{\tilde{v}} l_i$ – сумма длин записей всех близких внутренних модулей включая опорный.

Построим конечные формулы для вычисления \tilde{v} и $\sum_{i=1}^{\tilde{v}} l_i$.

Упорядочим близкие внутренние модули $\{M\}_v^{in}$ по числу полей:

$$l > l_1 \geq l_2 \geq \dots \geq l_v.$$

Здесь $l_1 = l - 1$, $l_2 = l_1 - 1$, ..., $l_v = l_v - 1$.

Разделим эти модули на подгруппы.

Первая подгруппа: $v_1 = 1$ – есть опорный модуль M с числом полей l ; вторая: $v_2 = 2$ – модули длиной $l - 1$ в количестве 2 и т.д. Всего подгрупп: $t = \left[\frac{1}{2} l \right] + 1$. Число модулей $\tilde{v} = \sum_{i=1}^t v_i$, $v_i = i$, $v = \tilde{v} - 1$ (v – число внутренних близких модулей без опорного). Получаем: $\tilde{v} = \frac{1}{2} t(t + 1)$.

Далее, число используемых модулями полей в подгруппе v_i есть

$$\tilde{l}_i = i(l - (i - 1)), i = 1, \dots, t.$$

Тогда $\sum_{i=1}^{\tilde{v}} l_i = \sum_{j=1}^t \tilde{l}_j$, или:

$$\sum_{i=1}^{\tilde{v}} l_i = \sum_{j=1}^t (l + 1) \sum_{j=1}^t j - \sum_{j=1}^t j^2.$$

Воспользуемся известной формулой:

$$\sum_{i=1}^t i^2 = \frac{1}{6} t(t + 1)(2t + 1).$$

После несложных вычислений получаем:

$$\sum_{i=1}^t \tilde{l}_i = \frac{1}{6}t(t+1)(3l-2t+2).$$

Подставляем в I_1^{in} выражения для \tilde{v} и $\sum_{i=1}^t \tilde{l}_i$, получаем:

$$I_1^{in} = \frac{1}{3}t(t^2 - 1).$$

Рассмотрим подробнее структуру полей I_1^{in} . Все поля близких внутренних модулей можно разделить на 3 части:

$$\tilde{v} \cdot l = \tilde{I}_1^{in} + \sum_{i=1}^{\tilde{v}} l_i + (I_1^{in} - \tilde{I}_1^{in}).$$

Как следует из способа упорядочивания внутренних близких модулей все неиспользуемые ими поля I_1^{in} состоят из двух равных частей: $I_1^{in} = 2 \cdot \tilde{I}_1^{in}$. Отсюда:

$$\tilde{I}_1^{in} = \frac{1}{6}t(t^2 - 1), \text{ где } t = \left\lfloor \frac{1}{2}l \right\rfloor + 1.$$

3.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ВНУТРИФАЙЛОВОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ \tilde{I}_1^{out}

Вычислим аналогичную оценку для внешних модулей \tilde{I}_1^{out} .

Пусть число d – допустимое расширение полей базового модуля M с записью l . Предполагается, что поля этого расширения будут использоваться внешними близкими модулями к опорному модулю M . Вычислим $\max d$.

Рассмотрим модуль \tilde{M} с числом полей \tilde{l} ($\tilde{l} \leq l$). Поля модуля \tilde{M} имеют общие поля с полями модуля M вместе с расширением d . Пусть среди полей модуля \tilde{M} есть поле, не входящее в состав полей модуля M вместе с расширением d . Для того чтобы вычислить $\max d$, полагаем $\tilde{l} = l$. Покажем, что \tilde{M} не является близким к M . Тогда с помощью формул для I_1 , I_2 и определения близости модулей получаем:

$$I_1 = 2(l+d+1) - (l+d+\tilde{l}), \quad I_2 = (l+d+\tilde{l}) - (l+d+1).$$

Пояснение к формулам.

Здесь $(l + d + 1)$ – общее число полей, используемых двумя модулями – M и \tilde{M} , $(l + d)$ – поля модуля M вместе с расширением, l – длина модуля \tilde{M} . Число избыточных полей для двух модулей – I_1 . Число общих полей для M и \tilde{M} есть I_2 . Согласно определению близости, M и \tilde{M} не являются близкими, если $I_1 > I_2$. Отсюда: $l - 1 < d + 2$, или $\max d = l - 2$.

Количество всех избыточных полей внешних модулей есть

$$I_1^{out} = (l + d)\tilde{w} - \sum_{i=1}^{\tilde{w}} l_i.$$

Здесь \tilde{w} – общее число внешних модулей (включая опорный).

Построим формулы для \tilde{w} и $\sum_{i=1}^{\tilde{w}} l_i$.

Поля I_1^{out} , так же как и \tilde{I}_1^{in} , увеличивают время поиска модулями своих полей. Построим все внешние модули, близкие к опорному модулю M . Первое поле опорного модуля есть ϕ_s .

Упорядочим внешние близкие модули. Способ упорядочивания другой, чем в п. (3.1). Выберем модуль M_1 тоже длиной записи l , но с первым полем ϕ_{s-1} , и найдем все близкие внешние модули с длиной записи меньше l , но первое поле которых осталось прежним: ϕ_{s-1} .

Количество таких модулей есть: $w_1 = \left[\frac{1}{2} \tilde{l}_1 \right] - 0$, где

$$\tilde{l}_1 = l + 1.$$

Следующий модуль M_2 в процедуре упорядочивания модулей имеет также длину l , но первое поле для M_2 есть ϕ_{s-2} . Напомним, что все поля пронумерованы натуральным рядом чисел. Находим все близкие внешние модули к набору из M и M_1 , для которых длины записей меньше l , но первое поле по-прежнему ϕ_{s-2} . Количество таких модулей есть:

$$w_2 = \left[\frac{1}{2} \tilde{l}_2 \right] - 1, \text{ где } \tilde{l}_2 = l + 2.$$

В общем виде $w_i = \left[\frac{1}{2} \tilde{l}_i \right] - (i-1)$, где $\tilde{l}_i = l+i$, $i=1, \dots, d$.

Допустимое расширение полей опорного модуля, как показано выше, есть d . Теперь $w = \sum_{i=1}^d w_i$ или $w = \sum_{i=1}^d w_i \left[\frac{1}{2} (l+i) \right] - \sum_{i=1}^d (i-1)$.

После несложных преобразований:

$$w = \frac{1}{2} \left(l \cdot d + \left[\frac{1}{2} d^2 \right] \right) - \frac{1}{2} d(d-1) \quad (\text{без опорного модуля}).$$

Построим формулу для $\sum_{i=1}^{\tilde{w}} l_i$ – число полей используемых

внешними близкими модулями. Выражение для $\sum_{i=1}^{\tilde{w}} l_i$ можно записать как

$$\sum_{i=1}^{\tilde{w}} l_i = \sum_{i=1}^d \sum_{t=1}^{w_i} (l - (t-1)) + l.$$

Здесь $\tilde{w} = w+1$. Слагаемое l в формуле означает, что учитывается опорный модуль.

Выражение для $\sum_{i=1}^{\tilde{w}} l_i$ запишем в виде:

$$\sum_{i=1}^{\tilde{w}} l_i = \sum_{i=1}^d \sum_{t=1}^{w_i} l - \sum_{i=1}^d \sum_{t=1}^{w_i} t + \sum_{i=1}^d \sum_{t=1}^{w_i} 1 + l$$

или

$$\sum_{i=1}^{\tilde{w}} l_i = l \sum_{i=1}^d w_i - \sum_{i=1}^d \frac{1}{2} w_i (w_i + 1) + \sum_{i=1}^d w_i + l$$

окончательно

$$\sum_{i=1}^{\tilde{w}} l_i = l \cdot \tilde{w} - \left[\sum_{i=1}^d \frac{1}{2} w_i^2 \right] + \left[\frac{1}{2} w \right]$$

Таким образом построены формулы для \tilde{w} и $\sum_{i=1}^{\tilde{w}} l_i$. Теперь

легко вычислить I_1^{out} .

Рассмотрим подробнее структуру I_1^{out} . Так же, как в п. 3.1, величина I_1^{out} состоит из двух частей:

$$\tilde{I}_1^{out} \text{ и } (I_1^{out} - \tilde{I}_1^{out}), \text{ причём } \tilde{I}_1^{out} < (I_1^{out} - \tilde{I}_1^{out}).$$

Здесь \tilde{I}_1^{out} есть та часть избыточных полей I_1^{out} , которая увеличивает время доступа модулями к своим полям в наборе полей группы F . Заметим, как следует из способа упорядочивания общих внешних модулей, последнее поле опорного модуля не используется всеми внешними модулями.

Как указано выше, первые поля внешних модулей находятся среди полей расширения d , но их длины не превосходят длины l опорного модуля. Число этих неиспользуемых полей есть w (число внешних модулей)

После удаления последнего неиспользуемого модулями поля опорного модуля неравенство $\tilde{I}_1^{out} < (I_1^{out} - \tilde{I}_1^{out})$ переходит в равенство $\tilde{I}_1^{out} = (I_1^{out} - w - \tilde{I}_1^{out})$.

Отсюда окончательная верхняя оценка избыточных близких внешних полей есть

$$\tilde{I}_1^{out} = \frac{1}{2}(I_1^{out} - w).$$

4. Заключение

Таким образом, построены формулы для \tilde{I}_1^{in} и \tilde{I}_1^{out} , позволяющие легко вычислить верхние оценки внутрифайловой избыточности одной группы близких модулей. Эти же формулы могут быть использованы для вычисления величины избыточности и других групп близких модулей, составляющих базу данных.

Вычисленные величины позволяют более точно оценить затраты времени при запросе модулями информации из базы данных в реальном времени и оптимизировать структуру базы данных.

Литература

1. ДЕЙТ К.ДЖ. *Введение в системы баз данных.* – 8-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – С. 1328.
2. ДЯТЧИНА Д.В. *Применение алгоритма оптимизации запросов на основе внесения контролируемой избыточности в базах данных // Вести высших учебных заведений Черноземья.* – 2012. – №4. – С. 48–51.
3. МИРОШНИК С.Н. *Алгоритм оптимизации структуры базы данных реального времени с минимальной избыточностью информации // Некоторые алгоритмы составления расписаний в многопроцессорных системах.* – М.: ВЦ РАН, 2015. – С. 25–34.
4. МИРОШНИК С.Н. *Алгоритмы построения базы данных с минимальной избыточностью информации для систем реального времени // Труды межд. конф. по исследованию операций ORM-2016, 17-22 октября 2016, Москва.* – М.: ФИЦ ИУ РАН, 2016. – С. 51–52.
5. МИРОШНИК С.Н., ГОНЧАР Д.Р., ФУРУГЯН М.Г. *Оптимизация структуры базы данных реального времени // Управление большими системами.* – 2017. – Вып. 66. – С. 158–170.
6. МИРОШНИК С.Н. *Алгоритм оптимизации структуры базы данных с неограниченным числом файлов и минимальной избыточностью информации для систем реального времени. // Некоторые алгоритмы планирования вычислений в многопроцессорных системах.* – М.: ФИЦ ИУ РАН, 2017. – С. 29–38.
7. ТОНОЯН С.А., ЕЛИСЕЕВ Д.В., БАЛДИН А.В. *Избыточность темпоральных данных хранимых в реляционных СУБД // Территория инноваций.* – 2017. – №8(12). – С. 15–23.
8. ULMAN L. *PHP6 and MYSQL for dynamic web sites.* – Peachpit Press, 2007.

REAL TIME DATABASE STRUCTURE OPTIMIZATION

Sergey Miroshnik, Federal Research Centre «Informatics and Control» of RAS, Moscow, Cand. Sc., (rtsccas@ya.ru).

Dmitry Gonchar, Federal Research Centre «Informatics and Control» of RAS, Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Cand. Sc., (trpl@ya.ru).

Abstract: The problem of minimizing the redundancy of information in the real-time database, which affects the time of access to the database and the implementation of modules is studied. A set of software modules that use information from a set of fields with a known frequency of filling in real-time information is specified. The problem is solved if all modules are completed by the specified time. The complexity of this problem is caused by possible modules dependency (may work in a certain sequence) and the difficulty to allocate sufficient computing resources and time for real-time optimization. Therefore, the solution developed by the authors in the instrumental CAD real time systems is divided into two stages: (a) the preliminary stage (not in real time), which is the formation of groups of close modules and (b) the stage of solving the problem in real time, using the performed at the preliminary stage of optimization of the location of fields in files. The information redundancy of three types is defined: intra-file, cross-file, intra-module. A special model of the designed database is proposed and analytical formulas for calculating the number of fields not used by the modules are constructed.

Keywords: the database management system, real-time systems, heuristic algorithms, optimization.

УДК 519.86

ББК 22.18

DOI: 10.25728/ubs.2018.76.9

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Э.Ю. Калимулиной.*

Поступила в редакцию 29.01.2018.

Опубликована 30.11.2018.